

文章编号:1000-1301(2004)03-0057-07

## 上海环球金融中心大厦结构模型振动台抗震试验

吕西林<sup>1</sup>, 邹 昀<sup>1,2</sup>, 卢文胜<sup>1</sup>, 赵 斌<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 江南大学 土木工程系, 江苏 无锡 214063)

**摘要:**上海环球金融中心大厦高101层, 结构高度492m, 高宽比8.49, 拟建成为世界上结构主体最高的建筑物。大厦采用了三重结构体系抵抗水平荷载, 它们由巨型框架、钢筋混凝土核心筒及构成核心筒和巨型型钢混凝土柱之间相互作用的伸臂桁架组成; 核心筒竖向不连续, 由低筒、中筒和上部筒3部分组成; 二对角巨型柱在42层以上开始分叉形成倾斜曲面, 巨型斜撑只设置在垂直立面上, 且采用单向支撑。根据我国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002), 该建筑总高超过了型钢混凝土框架-钢筋混凝土筒体最大高度190m的限值, 同时高宽比超过了设防烈度7度地区为7的限值。为研究它在地震作用下的抗震性能, 进行了缩尺(1/50)模型的振动台试验。试验结果表明, 该结构体系合理, 具有足够的水平刚度, 在地震作用下位移反应不大, 扭转效应比较小, 满足我国抗震设防要求。

**关键词:**超高层; 缩尺模型; 振动台试验; 抗震性能

**中图分类号:** P315.97      **文献标识码:** A

## Experimental study on Shanghai World Financial Center

Lü Xilin<sup>1</sup>, Zou Yun<sup>1,2</sup>, Lu Wensheng<sup>1</sup>, Zhao Bin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Civil Engineering Department, Southern Yangtze University, Wuxi 214063, China)

**Abstract:** The height of 101-storeyed Shanghai World Financial Center is 492m. This makes it possible to be the tallest building in the world. Its aspect ratio of height to width is 8.49. Three parallel structural systems composed of the mega-structure, the reinforced concrete and braced steel services core and the outrigger trusses, are employed to resist lateral loads. The reinforced concrete consisting of lower core, middle core and upper core are not continuous vertically. Instead of providing braced frames at the exterior curved surfaces of the building, a single-diagonal system is adopted on the vertical faces in the mega-structure frame. According to the technical specifications for concrete structures of tall building (JGJ3-2002), the height of the building clearly exceeds the stipulated maximum height of 190m for a composite frame/reinforced concrete core building. The aspect ratio also exceeds the stipulated limit of 7 for a basic seismic intensity of 7. A scaled model was made and tested on the shaking table to study its dynamic characteristics, seismic responses and evaluate its capacity to withstand earthquake. The test results demonstrated that the adopted system is an ideal solution for the building to withstand earthquake. The inter-story drift and the overall torsion meet the requirements regulated by Chinese design codes.

**Key words:** super-tall building; scaled model; shaking table test; seismic behavior

收稿日期:2004-03-20; 修订日期:2004-06-02

基金项目:国家自然科学基金项目(50025821, 50338040);上海市科技发展基金项目

作者简介:吕西林(1955-),男,教授,博士,从事结构抗震研究.

## 引言

拟建在上海市陆家嘴金融贸易区的上海环球金融中心大厦(简称“环球中心”),由日本森大厦株式会社一级建筑师事务所(Mori Building Architects & Engineers)负责总设计和审查;美国 KPF(Kohn Pederson Fox Associates)建筑师事务所负责建筑设计;美国赖思里·罗伯逊联合股份有限公司(Leslie E. Robertson Associates)负责结构设计。受上海环球金融中心有限公司委托,同济大学土木工程防灾国家重点实验室振动台试验室对上海环球金融中心进行了模拟地震动的振动台模型、节点试验及弹塑性时程分析等研究,本文主要介绍振动台模型试验的研究。

这是一幢以办公为主,集商贸、宾馆、观光、展览及其他公共设施于一体的大型超高层建筑。主楼地下 3 层,地上 101 层,地面以上高度 492m,拟建成目前世界上结构主体最高的建筑物。建筑平面为  $57.95\text{m} \times 57.95\text{m}$  的正方形,大楼建筑面积为  $252\,935\text{m}^2$ ,裙房为  $33\,370\text{m}^2$ ,地下室为  $63\,751\text{m}^2$ ,合计约  $35\text{万}\text{m}^2$ ,标准层结构平面如图 1 所示。

环球中心的结构设计以中国规范和部分美国规范为依据。结构采用钢与混凝土的混合结构,结构体系的主要特点有:(1)采用三重结构体系抵抗水平荷载,它们分别是由巨型柱、巨型斜撑以及带状桁架构成的三维巨型框架结构、钢筋混凝土核心筒结构以及构成核心筒和巨型结构柱之间相互作用的伸臂钢桁架,这三重结构体系位置关系见图 2;(2)核心筒沿高度方向不连续,在 57 层~60 层及 78 层~79 层楼层处核心筒进行了二次转换,连接部分构造复杂,见图 3;(3)沿结构高度设置的 3 道伸臂桁架均未在核心筒内贯通;(4)三维巨型框架采用了单向斜撑,巨型柱 B 在 42 层以上分叉后形成的倾斜面上未设置斜撑。因此,周边巨型框架未形成闭合体系。

根据我国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002)<sup>[1]</sup>,该建筑总高超过了钢框架-钢筋混凝土筒体结构最大高度 160m 的和型钢混凝土框架-钢筋混凝土筒体最大高度 190m 的限值,同时高宽比超过了设防烈度 7°地区为 7 的限值,均超过了我国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002)的限值。鉴于环球中心结构体系的复杂性、结构高度及体型超限,对环球中心进行了缩尺模型的振动台试验,研究该结构在地震作用下的动力特性和结构的动力反应,评价其抗震性能。

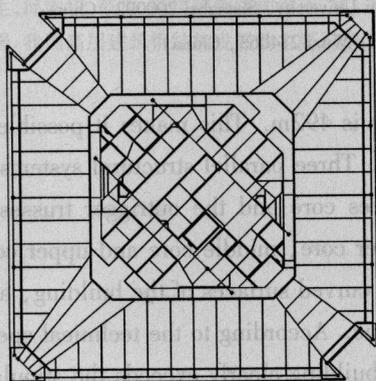


图 1 标准层结构平面

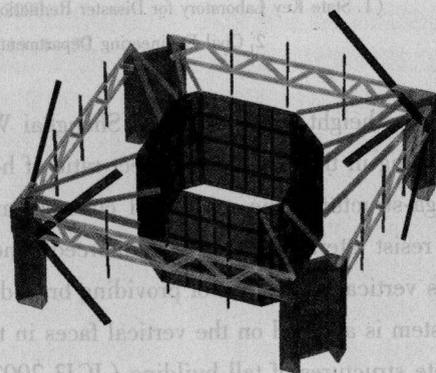


图 2 三重结构体系

## 1 模型设计与制作

根据结构的具体特点、模型制作和试验条件,首先确定几何相似比为 1/50;考虑到振动台噪声、台面承载力和振动台性能参数等因素将加速度相似比定为 2.5;试验室可以实现的混凝土弹性模量相似比一般为 1/5~1/3,进行模型设计时初步确定混凝土弹性模量相似比为 0.2,钢材的弹性模量相似比为 0.5。在模型施工完成后,对模拟钢材的紫铜和施工过程中同步制作的混凝土试块进行了材性试验,得到了实测的混凝土平均弹性模量相似比为 0.26,钢材与铜材的弹性模量比为 0.53,考虑到该结构是钢-混凝土组合结构,试验最终确定的弹性模量相似比确定为 0.32,模型结构的主要相似关系见表 1。钢构件的截面尺寸和混凝土构件配筋根据等强设计要求确定。

表 1 模型结构主要相似关系

物理量	尺寸	弹性模量	应变	时间	质量	加速度	质量密度	集中力
相似比	1/50	0.32	1	1/11.18	1/24 365	2.5	6.4	1/7 813

环球中心采用了三重结构体系抵抗水平荷载——巨型框架、核心筒和伸臂桁架,因此,楼板对整个结构的抗侧刚度贡献很小。为解决小比例模型的施工问题,本试验对结构模型进行了部分简化,在模型设计时,每隔一层标准层抽除一层楼板,将被抽除楼板的恒、活载均平分至该楼层的上、下邻层,并根据抗弯刚度和强度等效的原则修正楼面钢梁和钢柱。结构加强层和核心筒转换处等特殊楼层不作简化。全结构共抽除 27 层楼板。

在模型设计简化前,利用有限元软件 ANSYS 对该结构进行了两种对比计算,一是计算原结构,二是计算抽去部分标准层楼板后的简化结构。计算结果表明,简化前、后结构自振周期的最大差异是 2.33%;不同地震作用下的动力反应差异不大,如抽层后结构各层位移最大增加 5.59%;层间位移角最大增加 8.15%,结构层间位移角曲线分布的特征无显著改变。这一结果表明,抽去模型结构的部分标准层楼板是可行的,按抽层模型结构进行抗震试验分析是偏于安全的。

根据相似关系的要求,模型材料采用微粒混凝土、镀锌铁丝和紫铜。微粒混凝土用来模拟混凝土,以较大粒径的砂砾为粗骨料,以较小粒径的砂砾为细骨料。它的施工方法、振捣方式、养护条件以及材料性能都与普通混凝土十分相似,在动力特性上与原型混凝土有良好的相似关系,可以通过调整配合比,满足降低弹性模量的要求。采用紫铜模拟钢材,紫铜可根据需要进行裁剪、拼接、弯制或焊制成各种截面形式。镀锌铁丝用来模拟钢筋,它可以绑扎、焊接或搭接并弯制成任何形状,还可利用铁丝网作为墙、板分布筋。模型的外模采用有机玻璃,这样模型表面平整光滑,可及时发现浇筑过程中的问题。内模采用泡沫塑料,即使局部内模不能拆除,由于泡沫塑料和混凝土相比,在密度、抗弯模量、抗剪模量方面都很小,因此对模型刚度影响很小。模型的典型结构平面见图 3。

通过设置配重来满足质量和活荷载的相似关系。对试验模型进行配重时,为满足《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002)<sup>[1]</sup>中提出的考虑偶然偏心的要求,通过在楼板上不对称地布置配重来实现规程中质心偏心距  $e_i = \pm 0.05L_i$  的要求。对于主要的抗侧力构件如巨型斜撑,为更好地模拟它的实际反应,在巨型斜撑上绑扎了铅块,以实现质量相似关系的要求。模型总质量为 18.3t,其中模型和附加质量 14.7t,底座质量 3.6t。加质量块前、后对模型各做了一次脉动测试,试验前对振动测试系统进行了标定。模型吊装就位,固定在振动台上,并布置附加质量块后见图 4。

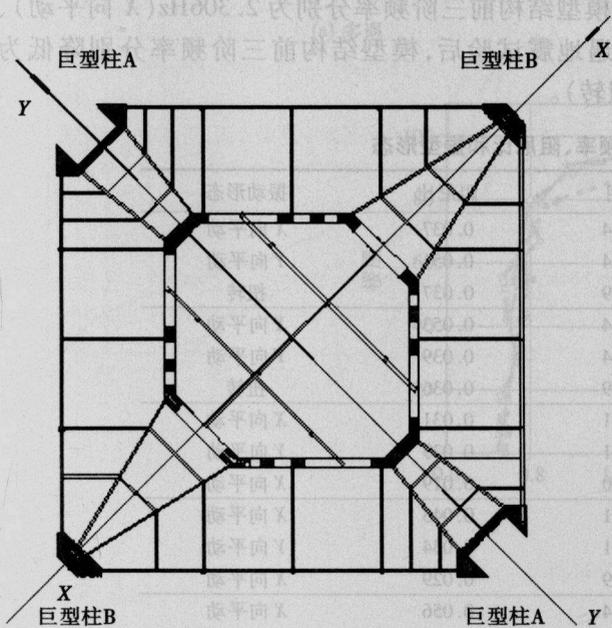


图 3 标准模型结构平面图

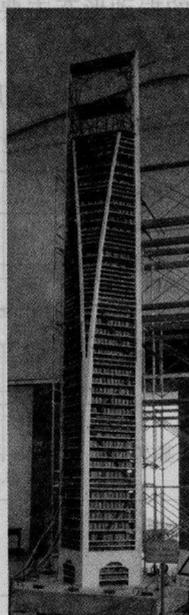


图 4 模型全景

## 2 试验方案

试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室的大型高性能三向六自由度模拟地震振动台上进行。根据上海地区7°抗震设防及IV类场地要求,选用了El Centro地震波、San Fernando地震波和上海人工SHW2地震波作为振动台输入的台面激励。试验时分别按照7°多遇烈度、7°基本烈度、7°罕遇烈度和8°罕遇烈度的顺序分4个阶段由台面依次输入El Centro波、San Fernando波和SHW2波。地震波持续时间按相似关系压缩为原地震波的1/12.49,输入方向分为双向或单向水平输入。在不同水准地震波输入前后,均对模型进行白噪声扫频,以测量结构的自振频率、振型和阻尼比等动力特征参数。各水准地震下,台面输入加速度峰值均按《上海建筑抗震设计规程》(DGJ08-9-2003)<sup>[2]</sup>规定及模型试验的相似关系要求进行了调整,以模拟不同水准地震作用。

在模型上布置了加速度计、位移计和应变片,试验过程中数据采集处理系统自动采集模型结构在输入不同台面激励下的加速度、位移和应变等数据。根据采集的地震反应数据及观察到的模型结构破坏情况,可分析推断原型结构的地震反应及其综合抗震性能。

## 3 模型试验结果

### 3.1 试验现象

在7°多遇地震和7°基本地震试验阶段后,模型表面均未发现裂缝。不同水准地震波输入结束后用白噪声扫描,发现7°多遇地震阶段试验完成后模型自振频率未下降,说明结构未出现裂缝,7°基本地震试验结束后模型自振频率略有下降,说明结构发生微小裂缝,基本处于弹性工作阶段。在7°罕遇地震试验阶段各地震波输入下,模型表面观察还未发现明显的破坏现象,通过白噪声扫描,模型结构的自振频率继续下降。8°罕遇地震试验后,巨型柱A在5层~7层范围内混凝土被大片压碎,角部部分脱落,柱内纵筋外鼓;巨型柱A在6层顶和在7层顶出现水平裂缝,缝宽约为1.2mm;巨型柱B在6层顶部与底部均出现水平裂缝,缝宽约为0.8mm,中间出现斜向裂缝,缝宽约为1.5mm;巨型柱B在10层顶、18层底和22层底均出现水平裂缝,缝宽约为0.8mm;6~7层的楼层钢柱多数被压屈,破坏情况见图6。

### 3.2 模型结构动力特性

在不同水准地震作用前后,均用白噪声对结构模型进行扫频试验。通过对各加速度测点的频谱特性、传递函数以及时程反应的分析,得到模型结构在不同水准地震前后的自振频率、阻尼比和振型形态,见表2,模型结构的低阶振型的振动形态主要为平动和整体扭转;模型结构前三阶频率分别为2.306Hz(X向平动)、2.306Hz(Y向平动)和5.290Hz(扭转);在完成8°罕遇地震试验后,模型结构前三阶频率分别降低为1.628Hz(X向平动)、1.763Hz(Y向平动)和3.847Hz(扭转)。

表2 模型结构前三阶自振频率、阻尼比和振型形态

地震水准	实测频率	周期	阻尼比	振动形态
7°多遇前	2.306	0.434	0.037	X向平动
	2.306	0.434	0.051	Y向平动
	5.290	0.189	0.037	扭转
7°多遇后	2.306	0.434	0.053	X向平动
	2.306	0.434	0.039	Y向平动
	5.290	0.189	0.036	扭转
7°基本	2.170	0.461	0.031	X向平动
	2.170	0.461	0.037	Y向平动
	7.687	0.130	0.019	X向平动
7°罕遇	2.035	0.491	0.043	X向平动
	2.035	0.491	0.034	Y向平动
	7.189	0.139	0.029	X向平动
8°罕遇	1.628	0.614	0.056	X向平动
	1.763	0.567	0.044	Y向平动
	3.847	0.260	0.088	扭转

### 3.3 模型结构动力反应

通过对振动台 MTS 数据采集系统获得的各水准地震作用下模型结构的压电式加速度传感器的反应信号的分析处理,得到模型结构的加速度反应。不同水准地震作用下模型结构在 X 方向和 Y 方向各层最大加速度反应的变化规律基本相同。图 5 是 X 方向模型结构各层最大加速度反应。从图中可以看出,楼层的最大加速度反应自下而上并非呈倒三角形分布,在模型的顶部(80 层以上)的加速度变化相对于下部变化要大得多,地震反应剧烈。设有带状桁架的楼层中,42 层、66 层、78 层与它们下邻楼层相比,地震反应明显偏小,78 层的突变效应尤其显著,说明在 78 层设置加强层效果最明显,而在 18 层、30 层、54 层设置加强层的作用并不大。试验结果表明,随着台面输入地震波加速度峰值的提高,模型刚度退化,阻尼比增大,结构出现一定程度的破坏后,动力放大系数有所降低;帽带桁架的加速度反应大于结构主体的加速度反应,这说明帽带桁架的刚度突变导致鞭梢效应;由于扭转振型对结构加速度反应的影响,屋顶设置在二角点的测点 A 和 B 的加速度反应有一定的差异;随着台面输入地震波加速度峰值的提高,两点加速度反应的差异明显增加;Y 主向输入地震波时,顶层角点 A 与角点 B 处的加速度反应之间的差异,比 X 主向输入同样地震波时明显,这反映出布置偏心配重的影响。

从位移结果来看,X 方向与 Y 方向的位移反应几乎相同,这说明二方向的刚度一致,这与试验所测得的双方向上自振频率相同的结果吻合。图 6 是模型结构在 7° 各水准下的 X 方向最大位移包络图。从图中可看出,位移反应在顶层加剧。图 7 是模型结构在 7° 各水准下的剪力分布图。X 与 Y 方向上的剪力分布基本一致。

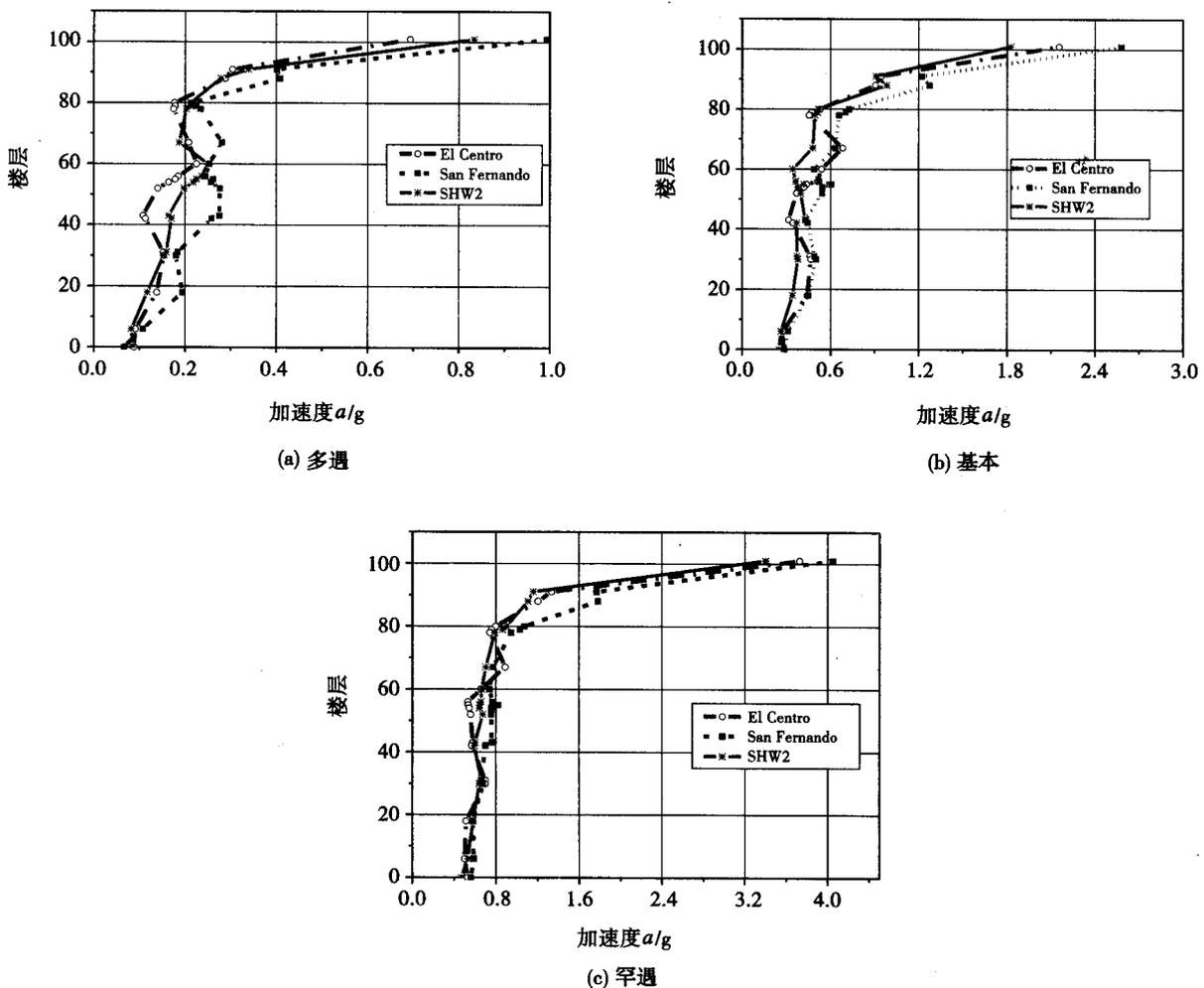


图 5 VII 度最大加速度包络图

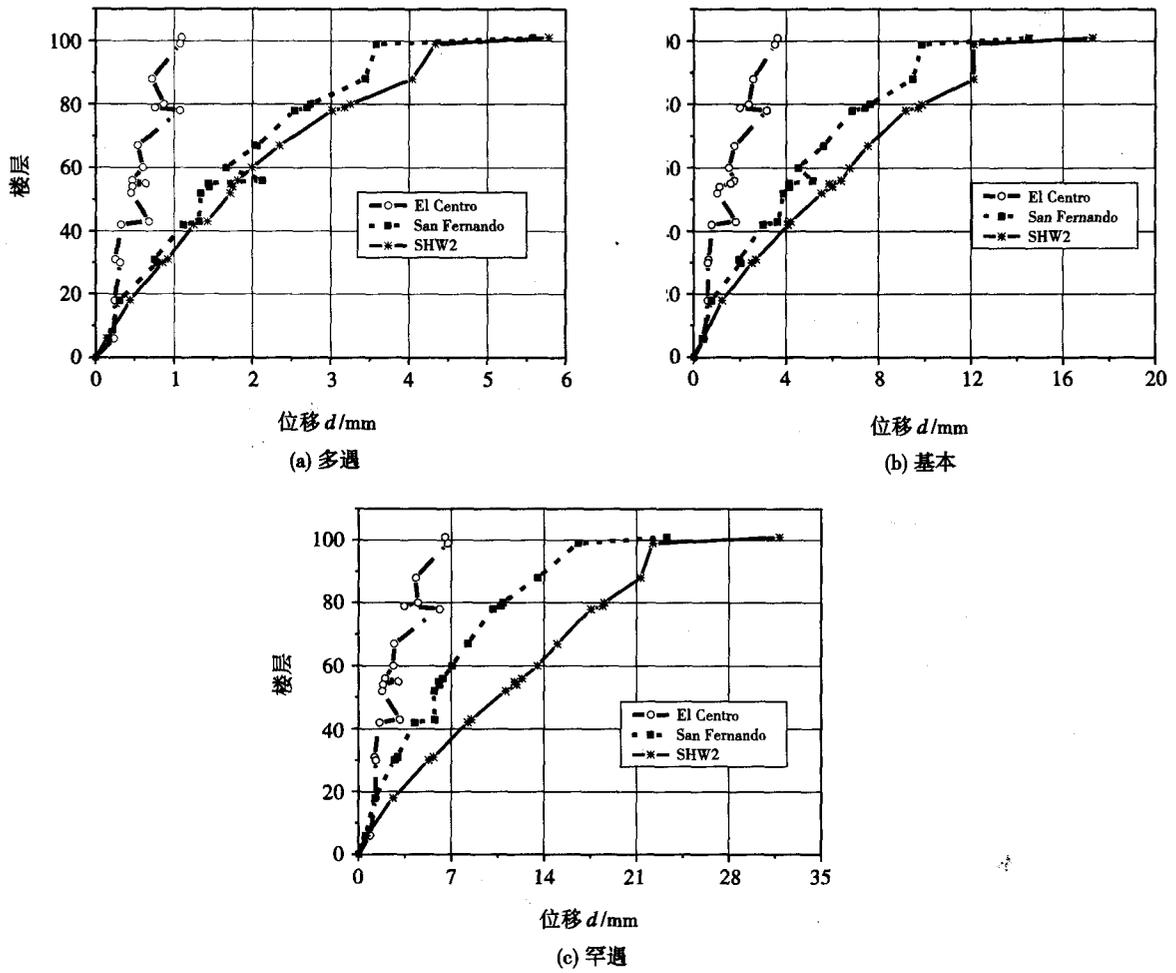


图6 VII度最大位移包络图

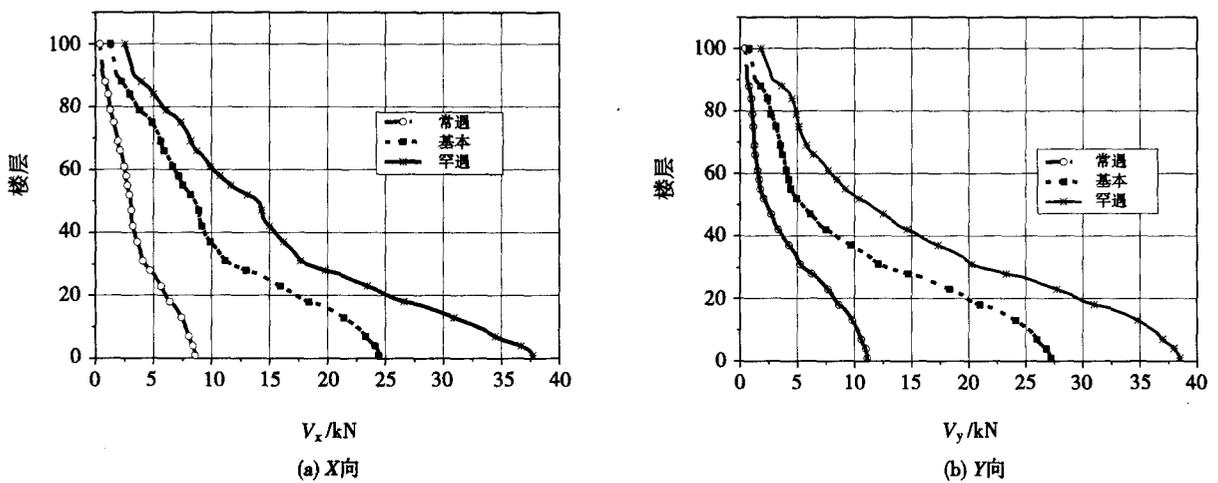


图7 剪力分布图

### 4 结论

通过对环球中心的结构整体模型模拟地震振动台试验,根据相似律换算得到原型结构特性,结论如下:

(1) 原结构第一自振频率为 0.206Hz, 振动形态为  $X$  方向平动; 结构第二自振频率为 0.206Hz, 振动形态为  $Y$  方向平动; 结构第三自振频率为 0.473Hz, 振动形态为扭转。相应的自振周期分别为 4.854s、4.854s 和 2.114s。结构频率随输入地震动幅值的增大而降低, 而阻尼比则随结构破坏的加剧而提高。

(2) 在 7° 多遇地震作用下, 结构总位移角最大值为:  $X$  方向 1/1495,  $Y$  方向 1/1567, 扭转角 1/761; 层间位移角最大值为:  $X$  方向 1/539,  $Y$  方向 1/707, 结构处于弹性阶段, 小于《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002) 的限值 1/500 的要求; 原型结构能够满足我国现行抗震规范“小震不坏”的抗震设防标准。

(3) 在 7° 基本烈度地震作用下, 结构自振频率和刚度稍有降低, 结构基本处于弹性阶段。

(4) 在 7° 罕遇地震作用下, 结构出现较小的开裂, 结构自振频率有一定下降, 结构总位移角最大值为:  $X$  方向 1/266,  $Y$  方向 1/261, 扭转角 1/361; 层间位移角最大值为:  $X$  方向 1/127,  $Y$  方向 1/151, 小于《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002) 的限值 1/100 的要求。原型结构能够满足我国现行抗震规范“大震不倒”的抗震设防标准。

(5) 同一烈度、同一水准的不同地震波输入时, 以 SHW2 波输入时模型结构的位移反应为最大。这说明结构的最大位移不仅取决于输入烈度的大小, 还取决于地震波的频谱特性。

(6) 层间位移角在有带状桁架的楼层处的变化趋缓, 说明这些楼层的刚度得到加强。

(7) 巨型柱 B 在 5 层顶、和巨型柱分叉前(41 层顶)的位置应力较大。

(8) 31 层和 55 层的伸臂桁架、带状桁架与斜撑交汇点处的斜撑上出现应变值最大, 而伸臂桁架、带状桁架中测到的应变值不大, 这说明伸臂桁架和带状桁架的作用与巨型斜撑相比不显著。

## 5 设计建议

根据环球中心模型结构模拟地震振动台试验结果, 建议适当增加以下部位构件的强度和延性, 以进一步改善结构的抗震性能:

- (1) 建议采取措施适当提高第 5 层和第 6 层巨型柱的强度和延性;
- (2) 在伸臂桁架、带状桁架与巨型斜撑的交汇处, 加强节点的连接;
- (3) 适当加强 6 层 ~ 7 层楼面钢柱的刚度。

### 参考文献:

- [1] JGJ3-2002, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑出版社, 2002.
- [2] DGJ08-9-2003, 建筑抗震设计规程[S]. 上海: 上海工程标准定额管理站, 2003.
- [3] 朱伯龙, 主编. 结构抗震试验[M]. 地震出版社, 1989.
- [4] Xilin Lu, Huiyun Zhang, *et al.* Shaking table testing of a U-shaped plan building model [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1999, 26: 746 ~ 759.
- [5] 黄世敏, 魏琰, 等. 高层建筑中水平加强最优位置的研究 [J]. 建筑科学, 2003, 19(2): 4 ~ 6.
- [6] 程绍革, 刘经纬. 上海仙乐斯广场模型振动台试验 [J]. 建筑科学, 1998, 14(5): 8 ~ 13.
- [7] Xilin Lu. Application of identification methodology to shaking table tests on reinforced concrete columns [J]. Engineering Structures, 1995, 17(7): 505 ~ 511.
- [8] Xilin Lu, Qiang Zhou. Dynamic analysis method of a combined energy dissipation system and its experimental verification [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(6): 1251 ~ 1265.