

# 上海世博会中国馆抗震分析与振动台模型试验研究

蒋欢军, 王 斌, 吕西林, 陈 云

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘 要:**2010年上海世博会中国馆建筑造型和结构体系独特,主体结构为4个钢筋混凝土筒体加组合楼盖,筒体间楼盖向上层层展开出挑,呈四棱台斗冠状。倒梯形的建筑造型使上部楼层的转动惯量增大,导致结构的第一振型为扭转振型,不满足现行高层结构设计规范的要求。为了研究该结构的抗震性能,检验和改进结构设计,利用有限元程序ANSYS对整体结构进行了抗震分析,同时又进行了比例为1/27的模拟地震振动台试验。计算结果表明,虽然中国馆的第一振型为扭转,但结构的扭转反应不大,和振动台试验结果具有较好的一致性。同时,原型分析和模型试验表明结构的损伤发展符合预期的破坏形式,能够满足预定的抗震设防目标。根据试验结果,给出了改进设计建议。

**关键词:**扭转振型;抗震分析;模拟地震振动台试验;地震损伤

**中图分类号:**TU973.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2011)03-0013-06

## Seismic Analysis and Shaking Table Test of China Pavilion for EXPO 2010 Shanghai

JIANG Huan-jun, WANG Bin, LU Xi-lin, CHEN Yun

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

**Abstract:** China Pavilion for Expo 2010 Shanghai is designed with peculiar style and special structural system. The main structure is composed of four concrete tubes with steel-concrete composite floors. It is designed with a shape of inverted trapezoid in elevation. The fundamental vibration mode of this structure is a torsional mode due to the special shape with greater moment of inertia in upper floor, which exceeds the limit value stipulated in Chinese code. The seismic analysis of prototype is carried out by ANSYS program to evaluate its overall seismic performance and improve the structural design. At the same time, shaking table tests of a 1/27-scale structural model are conducted. It is found that although the first mode is torsional, the torsional responses are not so large, which agrees well with the results of shaking table tests. Both the test results and calculation results demonstrate that the designed structural system satisfies the seismic damage patterns and meets the pre-defined performance objectives. Based on the test results, suggestions for improving design are also put forward.

**Key words:** torsional mode; seismic analysis; shaking table test; seismic damage

上海世博会中国馆位于世博会园区浦东区域中心位置,其结构造型独特。主体结构为4个钢筋混凝土筒体加组合楼盖,底部架空,自33.3 m标高以

上层层展开,展厅面积逐渐扩大,并向外挑出,形成下部小上部大的倒梯形造型,至屋顶60.3 m标高处最大悬挑跨度达33.8 m。为了满足大空间的建筑

**收稿日期:**2010-12-01

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51078272,51021140006);上海市教委科研创新项目(09ZZ32);北京市科技计划重点项目(D09050600370000)

**作者简介:**蒋欢军(1973-),男,教授,博士,主要从事工程抗震与防灾研究,(E-mail)jhj73@tongji.edu.cn。

使用功能要求,展厅内除 4 个楼电梯间外不设柱,利用落地的楼电梯间设置四个平面尺寸为  $18.6\text{ m} \times 18.6\text{ m}$  的钢筋混凝土筒体,结合建筑的倒梯形造型,在建筑物外围设置 20 根截面尺寸为  $800\text{ mm} \times 1\,500\text{ mm}$  的方钢管混凝土斜撑,为大跨度楼盖提供竖向支承。标高  $36.3\text{ m} \sim 49.5\text{ m}$  处的楼盖为型钢混凝土梁-混凝土板组合楼盖,标高  $60.3\text{ m}$  处屋面采用钢桁架-混凝土板组合楼盖<sup>[1]</sup>。其建筑效果图和屋盖结构平面布置如图 1 和 2 所示。



图 1 中国馆建筑效果图

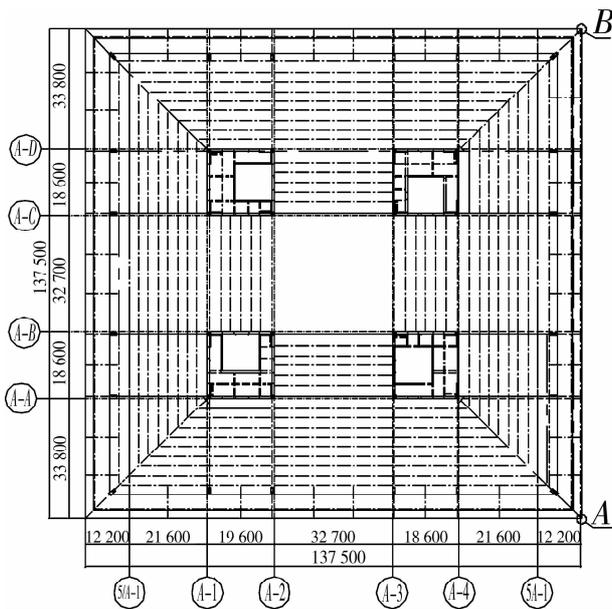


图 2 屋盖结构平面图

由于倒梯形的建筑造型使结构上部楼层的转动惯量逐渐增大,导致结构的第一振型为扭转振型<sup>[1-2]</sup>。结构扭转为主的第一自振周期  $T_1$  与平动为主的第一自振周期  $T_1$  之比大于 0.85,未能满足《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2002)<sup>[3]</sup> 4.3.5 条的要求。同时,由于本工程的中庭部分为  $32.7\text{ m} \times 32.7\text{ m}$  的中庭,在标高  $38.55\text{ m} \sim 46.65\text{ m}$  间楼板错层布置,使得楼层平面布置局部不连续<sup>[4]</sup>。

鉴于此,同济大学土木工程防灾国家重点实验室在原型结构抗震计算分析的基础上,对该结构进

行了模拟地震振动台试验,模型尺寸的比例为  $1/27$ ,主要考察结构在地震作用下的破坏机理和抗震薄弱环节。根据抗震分析和试验结果的综合对比研究,判断结构地震反应是否满足有关规范要求,评价结构的总体抗震性能,并提出相应的改进措施。

## 1 原型结构抗震计算分析

采用 ANSYS 分析程序<sup>[5]</sup>对中国馆进行了弹性计算分析,主要对其在 7 度多遇地震作用下的地震响应进行研究。

### 1.1 结构有限元分析模型

整体结构计算模型由 beam 单元和 shell 单元组成,beam 单元用于建立梁、柱、桁架和斜撑等构件,shell 单元用于建立楼板和筒体剪力墙构件,其中楼板考虑其弹性变形。Beam 单元数 12 374,Shell 单元数 9 087,共计单元数 21 461,节点数 9 685。结构计算总质量为  $1.23 \times 10^5\text{ t}$ 。整体结构计算分析模型如图 3 所示。计算模型的材料强度值采用设计强度,结构各部位构件所用材料及设计强度见表 1。

### 1.2 主要分析参数与计算方法

结构抗震设防烈度按 7 度考虑,场地类别为 IV 类,场地特征周期取为  $0.9\text{ s}$ ,模态阻尼比取  $0.04$ 。采用时程分析法计算结构在多遇地震作用下的地震响应。

选取 3 条地震加速度时程曲线作为输入地震波,其中 2 条为天然波,1 条为人工波,天然波选用 El Centro(1940)波和 Pasadena(1952)波,人工模拟地震波为上海市《建筑抗震设计规程》<sup>[6]</sup>中的人工波 SHW2。计算输入地震波加速度反应谱与上海市的规范反应谱<sup>[6]</sup>的比较见图 4 所示。

按照工程所在 7 度抗震设防区,输入地震波加速度峰值取  $35\text{ cm/s}^2$ 。地震波输入方法如下:El Centro 波和 Pasadena 波三向输入,分别以结构 X 向、Y 向作主水平向,并考虑 Z 向输入,三方向加速度幅值比为  $1:0.85:0.65$ 。上海人工波 SHW2,分别在 X 和 Y 向单向输入。

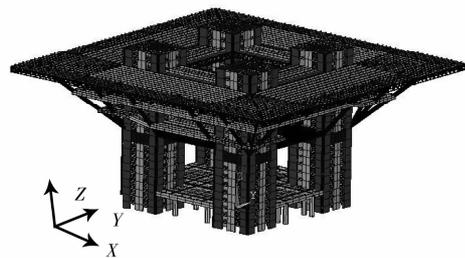


图 3 结构计算模型

表1 结构构件材料及设计强度

构件部位	材料	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
除 33.3 m、50.1 m、60.9 m 标高以外的其他楼盖	C30	14.3	1.43
柱	C35	16.7	1.57
33.3 m、50.1 m、60.9 m 标高处楼盖	C40	19.1	1.71
剪力墙	C50	23.1	1.89
型钢混凝土斜撑	C60	27.5	2.04
钢梁、钢桁架、型钢	Q345B	345	345

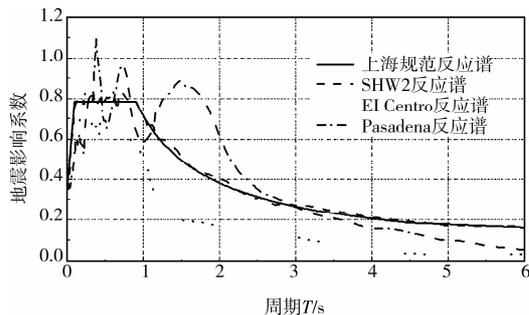


图4 输入地震波的反应谱与上海规范谱对比

### 1.3 时程计算分析结果

结构的前6阶振型特性见表2,第1阶振型为扭转,2和3阶分别为Y向和X向平动,其周期比不满足现行高层结构设计规范的要求。

在3种地震波输入下,计算得到的最大层间位移角和扭转位移比(最大楼层位移与平均楼层位移的比值)见表3所示。从表1中可以看出,作为主要抗侧力构件的4个筒体为整体结构提供了足够的刚度,其最大层间位移角满足现行规范限值1/1000的要求。

结构的整体变形是由各个结构单体变形协调的结果。国家馆的4个筒体作为结构的主要抗侧力构件,在平面布置上规则对称,结构的整体扭转则由4个筒体的综合抗扭刚度来抵抗。计算结果表明,虽然结构的第一振型为扭转,但是从表2整体结构的扭转位移比来看,结构的扭转效应并不明显,其对结构的抗震性能影响不大。

表2 结构自振特征

振型	周期/s	振型特征
1	1.36	整体绕Z轴扭转
2	1.14	整体Y向一阶平动
3	1.13	整体X向一阶平动
4	0.47	整体Y向二阶平动
5	0.46	整体X向二阶平动
6	0.45	大跨悬挑楼盖角部和中部翘曲

表3 结构最大层间位移角和位移比

地震输入	最大层间位移角	最大位移比
SHW2	X向	1/1 511
	Y向	1/1 477
EI Centro	X主向	1/2 406
	Y主向	1/2 387
Pasadena	X主向	1/1 480
	Y主向	1/1 610

图5给出了在7度多遇地震SHW2作用下屋面的两个角点A和B(见图2所示)在X向的位移时程。可以看出两个节点的X向位移时程大部分重合,最大相差值仅为5.7 mm(8.16 s时),屋面结构在地震作用下所激励起来的平面内转角仅为 $4.1 \times 10^{-5}$  rad。也就是说,结构的扭转反应没有被激励起来。

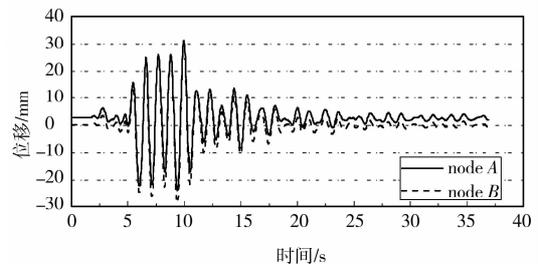


图5 节点A和B时程位移曲线

通过考察筒体在地震作用下的剪应力,可以预测结构构件是否出现损伤情况。考虑到在多遇地震作用时,结构在SHW2作用下地震响应最大,所以此处只列出墙体在SHW2作用,顶层位移最大时的墙体的剪应力,见图6所示。其中墙体1为A-A轴处墙体,墙体2为A-2轴处墙体。

从图中可以看出,大部分墙体的剪应力远小于混凝土剪切极限强度,具有良好的安全储备。转换层处的墙体与深连梁(标高28.8 m~33.3 m)受力复杂,出现应力集中现象,该处有少量混凝土剪应力值已超出剪切极限强度。

考虑到屋顶处楼盖悬挑跨度过大,为了考察楼板的承载力要求,图7列出SHW2作用和仅考虑重力荷载作用下屋盖楼板表面的拉应力图。

从图中可以看出,在X向地震作用(包括重力荷载)和仅考虑重力作用下,绝大部分楼盖拉应力小于混凝土抗拉强度。在与筒体与斜撑相交位置的楼板有部分应力集中情况超出了混凝土抗拉强度。鉴于此,在实际的结构设计中,设计方通过适当提高板的配筋率,控制板筋的应力水平及施加无粘结预应力等措施,达到满足承载力的要求和控制楼板裂缝

的目的<sup>[2]</sup>。同时,也可以看出重力荷载作用下所产生的楼盖拉应力约占总应力值的 75%,说明楼盖的应力主要由结构的自重荷载所引起。

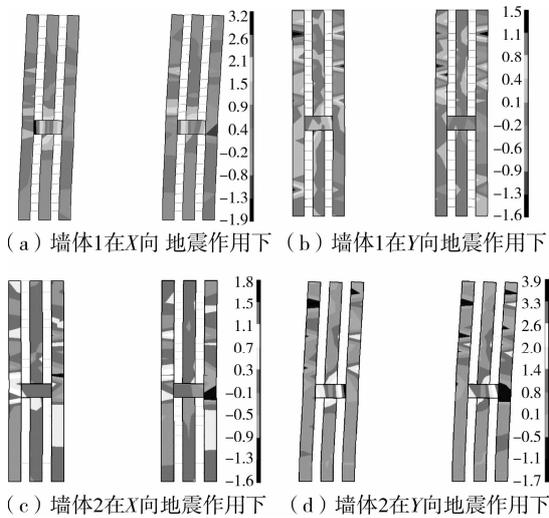


图 6 墙体在 SHW2 作用下剪应力图/MPa

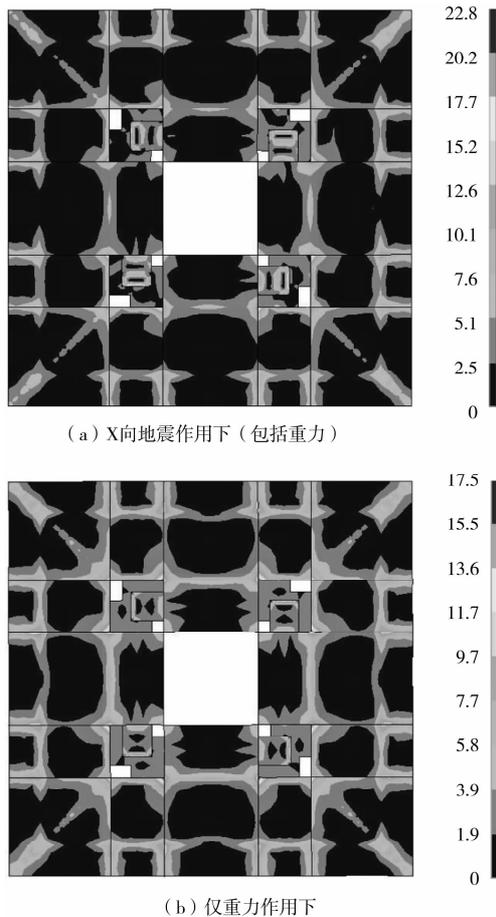


图 7 屋盖拉应力云图/MPa

考察外围设置的 20 个方钢管混凝土斜撑在地震作用下的轴向应力。在 X 向地震作用下,斜撑的轴向压应力最大值为 18.4 MPa。而仅在自重荷载

作用下,其轴向应力最大值为 17.6 MPa,二者均在设计范围之内。相对于 4 个筒体,斜撑的侧向刚度很小。因此,地震作用引起的斜柱轴力较小,斜柱轴力主要由竖向荷载引起。

## 2 模拟地震振动台试验

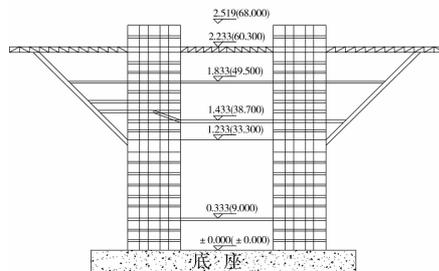
为了确保复杂超限高层结构抗震的安全可靠,除了采取有效的计算分析手段外,有必要进行模拟振动台试验,以便直观的研究结构的地震破坏机理,检验和改进结构设计<sup>[7-9]</sup>。鉴于此,同济大学土木工程防灾国家重点实验室对结构缩尺模型进行了模拟地震振动台试验。

### 2.1 模型设计

模型设计制作严格按照相似理论进行<sup>[10]</sup>,同时需要抓住结构的主要影响因素,简化和减少一些次要的相似要求,对于不同材料的高层结构模型设计,需要把握构件层次上的相似原则<sup>[11]</sup>。主要的简化内容包括部分楼面主次梁的简化、核心筒内墙的规则化及楼面主次梁截面配钢形式的简化、部分楼层夹层简化和楼面开洞的归一化。按照承载力相似关系设计构件配筋<sup>[12]</sup>。在该结构模型设计制作时,未考虑结构地下室部分,将整体模型嵌固在刚性底座上。试验模型中,混凝土用微粒混凝土模拟,型钢用紫铜模拟,钢筋用镀锌铁丝模拟。试验模型如图 8 所示。



(a) 振动台试验模型



(b) 模型标高(括号内为对应原型标高/m)

图 8 中国馆试验模型

### 2.2 相似关系

由于该结构为倒梯形造型,悬挑部分大,因此竖向地震动及结构自重对结构的影响较重要。为消除

重力失真的影响,结构的加速度相似系数取为1。其次,综合考虑实验室台面的大小和试验室可以实现的混凝土强度关系确定长度相似比和应力相似比。模型结构的主要相似关系见表4。试验时的模型相似关系按微粒混凝土强度和弹性模量实测值、模型实际附加质量等进行适当调整。

### 2.3 输入台面激励

根据7度抗震设防及IV类场地的要求以及上海市《建筑抗震设计规程》(DGJ 08-9-2003)的规定,选用与计算所用一致的地震波,依次进行了7度多遇、7度基本烈度、7度罕遇及8度罕遇地震作用下的试验。在不同水准地震动输入前后,均对模型进行白噪声扫频,以量测结构的自振频率、振型和阻尼比等动力特性参数。

表4 模型主要相似关系

物理参数	尺寸	等效弹性模量	频率	加速度
相似系数	1/27	1/7	5.196	1.0

### 2.4 动力特性

表5列出了模型在初始阶段和8度罕遇地震输入后模型动力特性的变化。

表5 模型动力特性

试验阶段	动力特性	振型序号		
		1	2	3
初始阶段	频率/Hz	4.590	5.340	5.343
	振型	扭转	Y向平动	X向平动
8度罕遇	频率/Hz	3.305	3.305	3.812
	振型	X向平动	扭转	Y向平动

从表5中可以看出,在8度罕遇地震作用后,结构的频率分别下降了27.9%(扭转)、28.6%(Y向平动)和38.1%(X向平动)。初始结构的第一振型为扭转,而在8度罕遇地震作用后,第一振型为X向平动,这也说明了结构X向的损伤程度大于Y向。

根据相似关系计算原型结构前三阶的自振周期分别为1.13 s、0.97 s和0.97 s,与表2中原型结构的自振周期相比差别约在15%左右。

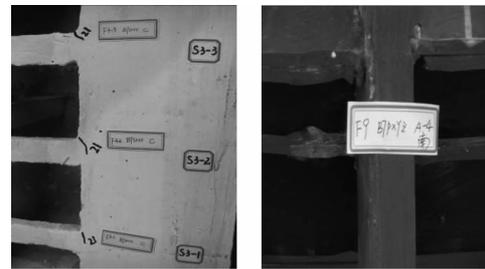
### 2.5 试验损伤现象

7度多遇地震试验阶段,模型表面未发现可见裂缝。地震波输入结束后用白噪声扫频,发现模型自振频率未下降,试验阶段模型结构处于弹性工作阶段。

7度基本烈度地震试验阶段,主体结构基本完好,少部分筒体连梁产生细微裂缝,个别斜撑出现扭曲现象,见图9所示。

7度罕遇地震试验阶段,中下部大部分筒体连梁(原结构标高9.0 m~28.8 m)端部出现弯曲裂缝,上部部分筒体(原结构标高33.3 m以上)连梁端部出现弯曲裂缝,同时在原结构标高33.3 m处的深连梁上出现对角斜裂缝;中下部筒体剪力墙上出现水平和斜裂缝,见图10所示。之前出现扭曲现象的斜撑的扭曲变形未进一步发展。

在8度罕遇地震试验阶段,绝大部分筒体连梁出现裂缝,部分连梁端部混凝土剥落;下部筒体剪力墙(特别是墙体根部)出现较多裂缝,部分墙体根部混凝土压碎剥落,见图11所示。之前有扭曲现象的斜撑扭曲变形未进一步发展。



(a) 连梁端部裂缝 (b) A-3轴斜撑扭曲

图9 试验模型破坏现象(7度基本地震)



(a) 1.233 m以下连梁端竖向裂缝 (b) 1.233 m处连梁斜向裂缝

图10 试验模型破坏现象(7度罕遇地震)



(a) 1.233 m处连梁斜向贯通裂缝 (b) 筒体角部混凝土压碎

图11 试验模型破坏现象(8度罕遇地震)

从模型结构的破坏情况来看,随着地震输入的不断增大,首先在连梁端出现裂缝,然后是剪力墙体上出现裂缝,结构具有良好的耗能破坏机制,符合预期的破坏形式。

## 2.6 原型结构位移响应

由模型试验计算原型结构位移的公式如下:

$$D_p = \left( \frac{a_t}{a_a} \right) \cdot \frac{D_m}{S_d} \quad (1)$$

其中  $D_p$  和  $D_m$  分别是原型和模型的位移;  $a_t$  和  $a_a$  分别是按照相似关系要求应输入的加速度和实际输入的加速度;  $S_d$  是模型位移相似关系。

图 12 列出了原型结构在不同地震输入下楼层的最大位移。从图中可以看出, X 向的位移大于 Y 向产生的位移。这可能是由于试验时, 每次地震动三向输入都是以 X 向为主方向, 使得整体结构在 X 向的动力反应值大于 Y 向的值。

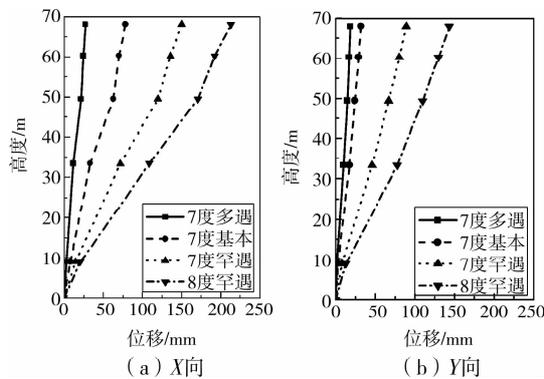


图 12 楼层最大位移

分别计算原型结构在不同地震输入下的最大层间位移角和最大扭转位移比, 如表 6 所示。在 7 度多遇地震作用时, X 向和 Y 向最大层间位移角分别为 1/2 003 和 1/2 893, 均小于 1/1 000 的限值。在 7 度罕遇地震作用下, X 向和 Y 向最大层间位移角分别为 1/352 和 1/634, 均小于 1/120 的限值。

表 6 最大层间位移角与最大扭转位移比

试验阶段	最大层间位移角		最大扭转位移比		
	X 向	Y 向	X 向	Y 向	XYZ 三向
7 度多遇	1/2 003	1/2 893	1.21	1.18	1.22
7 度基本	1/690	1/1 667	1.13	1.05	1.17
7 度罕遇	1/352	1/634	1.07	1.03	1.05
8 度罕遇	1/243	1/370	1.02	1.01	1.03

从表 6 中也可以看出整体结构的扭转位移比只有在 X 向和三向多遇地震输入时超出了 1.2, 小于 1.5 的限值, 说明整体结构扭转反应较小。

## 2.7 原型结构层间剪力

图 13 列出了不同地震输入下结构楼层的剪力分布。总体而言, 结构楼层剪力呈三角形分布。随着地震输入的不断增大, 楼层剪力也随之增大。在 X 向的楼层剪力大于 Y 向剪力的分布, 这也与图 11

中楼层位移的变形趋势一致。

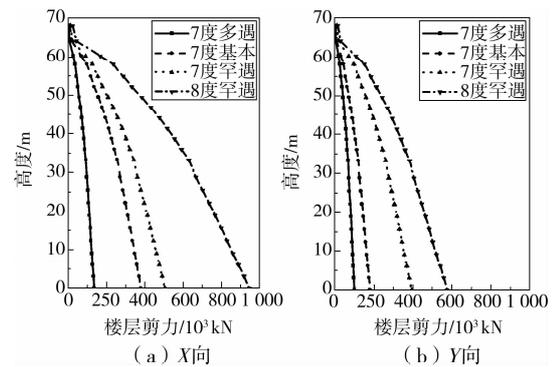


图 13 楼层剪力分布

## 3 结论与建议

通过上海世博会中国馆的计算分析和模拟地震振动台试验研究, 分析了结构的位移反应和破坏模式, 综合以上分析, 可以得出如下结论:

1) 在 7 度多遇地震作用下, 结构未出现损坏情况, 满足“小震不坏”的抗震设防标准, 整体结构的层间位移角满足规范的要求。

2) 在 7 度基本地震作用下, 只有少部分筒体连梁端部出现细微裂缝, 满足“中震可修”的抗震设防标准。

3) 在 7 度罕遇地震作用下, 大部分筒体连梁出现弯曲裂缝, 深连梁上出现对角裂缝, 中下部筒体剪力墙出现水平和斜裂缝, 满足“大震不倒”的抗震设防标准。整体结构的最大层间位移角满足规范要求。同时, 结构达到预期的损伤破坏形式, 具有合理的耗能机制。

4) 结构的弹性第一阶振型为扭转振型, 其周期比超限, 但整体结构在地震作用下的扭转反应不大, 楼层位移比基本满足规范要求。

5) 为改善结构的抗震性能, 建议适当减小标高 33.3 m 处的连梁截面高度(原高度为 4.5 m)及加强构造措施, 避免出现剪切破坏; 加强斜撑之间的横向连接, 使其能够抵抗较大的平面外地震作用; 适当增强高度 9.0 m~33.3 m 范围内结构构件的延性。

## 参考文献:

- [1] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 中国 2010 年上海世博会中国馆国家馆结构模型模拟地震振动台实验报告[R]. 上海: 同济大学, 2008.
- [2] 方小丹, 韦宏, 陈福熙, 等. 上海世博会中国馆国家馆结构与研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(5): 84-89.

(下转第 37 页)

- study of the influence of plate end anchorage of carbon fiber composite plates used to strengthen reinforced concrete beams [J]. *Composite Structures*, 1998, 42: 175-188.
- [6] HESHAM DIAB, ZHISHEN WU, KENTARO IWASHITA. Short and long-term bond performance of prestressed FRP sheet anchorages [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31: 1241-1249.
- [7] CARLO PELLEGRINO, CLAUDIO MODENA. Flexural strengthening of real-scale RC and PRC beams with end-anchored pretensioned FRP laminates [J]. *ACI Structural Journal*, 2009, 106: 319-328.
- [8] GB/T 7124—2008 胶粘剂拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料)[S].
- [9] ASTM D 1002-05. Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal)[S].
- [10] ASTM D 3528-96 (Reapproved 2008). Standard test method for strength properties of double lap shear adhesive joints by tension loading[S].
- [11] ASTM D 4896-01 (2008) e1. Guide for use of adhesive-bonded single lap-shear specimen test results[S].
- [12] ASTM D 5656-04 e1. Test method for thick-adherend metal lap-shear joints for determination of the stress-strain behavior of adhesives in shear by tension loading [S].
- [13] COGNARD J Y, DAVIES P, GINESTE B, et al. Development of an improved adhesive test method for composite assembly design[J]. *Composites Science and Technology*, 2005, 65: 359-368.
- [14] DAVIES P, SOSHIER L, COGNARD J Y, et al. Influence of adhesive bond line thickness on joint strength [J]. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009, 29: 724-736.
- [15] GB 50367-2006 混凝土结构加固设计规范[S].
- (编辑 王秀玲)

(上接第 18 页)

- FANG XIAO-DAN, WEI HONG, CHEN FU-XI, et al. Structural research and design for the China National Pavilion at the World Expo Shanghai [J]. *Building structure*, 2009, 39(5): 84-89.
- [3] JGJ3-2002 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [4] GB 50011-2001 建筑抗震设计规范(2008 年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] ANSYS Version 10.0[S]. ANSYS Inc, 2007.
- [6] DGJ 08-9-2003 上海市《建筑抗震设计规程》[S].
- [7] KO D W, LEE H S. Shaking table tests on a high-rise RC building model having torsional eccentricity in soft lower storeys [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006(35): 1425-1451.
- [8] LU X L, ZHANG H Y, HU Z L, et al. Shaking table testing of a U-shaped plan building model[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1999(26): 746-759.
- [9] LU X L, CHEN L Z, ZHOU Y, et al. Shaking table model tests on a complex high-rise building with two towers of different height connected by trusses[J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2009 (18): 765-788.
- [10] SABNIS G M, HARRIS H G, WHITE R N, et al. Structural modeling and experimental techniques [M]. Prentice-Hall; Englewood Cliffs, NJ, 1983.
- [11] 吕西林. 复杂高层建筑结构抗震理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [12] 周颖, 卢文胜, 吕西林. 模拟地震振动台模型实用设计方法[J]. *结构工程师*, 2003(3): 30-33.
- ZHOU YING, LU WEN-SHENG, LU XI-LIN. Practical model design method of shaking table tests[J]. *Structural Engineers*, 2003(3): 30-33.
- (编辑 胡玲)