

# 建筑幕墙地震作用机理及多模式再现试验方法

王洋玲<sup>1</sup>, 卢文胜<sup>1,2</sup>, 曹文清<sup>2</sup>

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 分析了建筑玻璃幕墙受到由主体结构传来的楼层加速度、层间位移变形等地震作用机理, 提出了应用模拟地震振动台再现多维地震作用的多模式加载试验方法. 针对某吊挂式玻璃幕墙支承结构特点, 设计和制作了安装在振动台上的多模式加载装置, 实现对该玻璃幕墙的多维加速度动力加载、平面内相对位移及吊杆内力的多模式加载, 验证了该方法的有效性和可行性. 最后, 对应用混合模拟方法研究建筑玻璃幕墙抗震性能进行了探讨.

**关键词:** 建筑玻璃幕墙; 多维地震作用; 多模式加载; 地震作用再现; 模拟地震振动台

**中图分类号:** TU317

**文献标志码:** A

## Seismic Action Mechanism and Multi-modal Reproducing Method of Architectural Curtain Wall

WANG Yangling<sup>1</sup>, LU Wensheng<sup>1,2</sup>, CAO Wenqing<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The seismic action mechanism of the architectural glass curtain wall, including floor acceleration and inter-story drift from main structure, was analyzed. Correspondently, a multi-modal loading test method with shaking table was proposed to reproduce the multi-dimensional seismic actions on the curtain wall simultaneously. To verify its validity and feasibility, an experiment, using a designed multi-modal loading device, was conducted to study the seismic performance of zonal hanging glass curtain wall on a complex high-rise building, which allowed for the synchronous realization of three-direction dynamic acceleration time-history actions, step-by-step loading of horizontal drifts and internal forces of steel sag rods. Finally, the hybrid simulation for the seismic performance of glass curtain-walls

was discussed.

**Key words:** architectural glass curtain-walls; multi-dimensional seismic actions; multi-modal loading; seismic actions reproduce; shaking table test

建筑幕墙由面板、锚固紧固件、密封填充材料、粘接密封材料和支承结构等组成, 是一种依附于主体结构的建筑围护系统, 可以直接承受施加于其上的各种作用, 同时, 它又是建筑物的外装饰, 具有建筑功能和强烈美学效果.

近年来发生的地震中, 可以观察到幕墙的各种震害, 主要表现为幕墙单元破坏(面板的破碎、坠落)和幕墙支承体系破坏(锚固紧固件的破坏、支承体系屈曲等), 对生命和财产的安全造成了严重威胁, 其抗震问题越来越受到重视. 尤其是随着新技术、新结构、新材料在幕墙中的应用和推广, 建筑幕墙呈现出多样化、大型化、复杂化的特点, 对于新型的幕墙体系, 其抗震性能更值得深入研究探讨.

现有幕墙规范<sup>[1-3]</sup>和幕墙振动台试验, 多数采用地面地震波作为幕墙地震作用的输入, 未充分考虑主体结构、幕墙安装方式等因素对幕墙地震作用的影响. 对于幕墙抗震性能评价, 规范给出了统一的加速度作用指标和平面内相对位移作用指标, 未明确给出不同地震水准下幕墙的抗震性能评价方法.

随着幕墙抗震研究和应用的开展, 在幕墙地震作用机理、地震作用再现试验方法和幕墙抗震性能评价方法等方面都得到了进一步的探索, 文献[4-5]中提出了用楼面反应谱表达幕墙受到的地震作用, 文献[4, 6-9]考虑主体结构楼层地震反应对幕墙的影响, 提出了改进的幕墙抗震性能考核指标和性能水准. 而对于幕墙受到的多维地震作用机理和如何

收稿日期: 2013-10-28

基金项目: 国家科技重大专项专题(2013ZX06005004-002-001)

第一作者: 王洋玲(1986—), 女, 博士生, 主要研究方向为结构抗震. E-mail: 1310006@tongji.edu.cn

通讯作者: 卢文胜(1967—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为建筑结构抗震. E-mail: wally@tongji.edu.cn

实现多维地震作用再现问题未见相关文献阐述,本文针对此问题进行深入研究.

## 1 建筑幕墙地震作用机理

幕墙系统依附于主体结构,一般都有一定的安装高度,其受到的地震作用输入不是简单的地面地震波,而是主体结构在地震作用下各楼层的地震反应,包括三向加速度作用和三向位移作用,即多维地震作用,如图1所示.

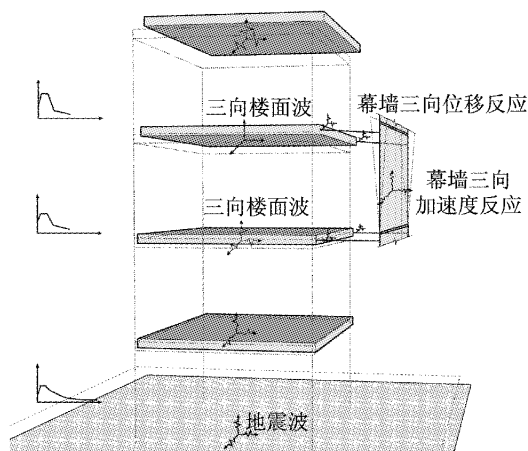


图1 幕墙地震作用机理示意图

Fig.1 Schematic diagram of seismic action mechanism of architecture curtain wall

将主体结构抽象为多自由度体系,在某一地震输入 $\ddot{u}_g(t)$ 作用下,体系的运动微分方程如式(1)所示:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -M\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中: $M$ 为主体结构质量矩阵; $C$ 为主体结构阻尼矩阵; $K$ 为主体结构刚度矩阵; $I$ 为单位列向量; $\ddot{u}(t)$ 、 $\dot{u}(t)$ 、 $u(t)$ 分别为主体结构相对加速度、相对速度、相对位移反应向量.

主体结构第 $i$ 层的三向加速度反应时程 $\ddot{u}_i(t)$ (即楼面波 $\ddot{x}_i(t)$ 、 $\ddot{y}_i(t)$ 、 $\ddot{z}_i(t)$ )和三向楼面相对位移反应时程 $u_i(t)$ (即 $x_i(t)$ 、 $y_i(t)$ 、 $z_i(t)$ ),可通过数值分析或模拟地震振动台试验获得,用于幕墙体系地震作用分析,其中假设幕墙单元上下端锚固于主体结构相邻楼层.

### 1.1 加速度作用

幕墙系统一般通过锚固件与主体结构连接,由于幕墙系统相对于主体结构的重量较小(一般小于1%),已有研究<sup>[10-12]</sup>表明在对主体结构进行分析时幕墙自身重量对主体结构基频影响小,可以忽略幕墙和主体结构之间的相互作用,因此采用主体结构

楼层楼面波 $\ddot{u}_i(t)$ 作为幕墙系统的加速度输入.

幕墙系统在地震中的加速度反应,受到楼面波和幕墙系统自身动力特性影响,为简化分析将相邻楼层的幕墙系统简化为单自由度体系,分别以主体结构各楼层的三向楼面波作为输入,通过反应谱方法分析幕墙系统在各方向楼面波单独作用下的加速度反应,得到幕墙的加速度反应谱.实际工程中,幕墙系统的加速度反应不仅受到场地条件、地震输入、主体结构动力特性的影响,还受到幕墙系统安装方式、幕墙系统动力特性等因素影响,因此,需采用具有包络意义的楼面加速度反应谱用于幕墙系统地震反应分析.

楼面加速度反应谱综合考虑了场地条件、地震输入、主体结构动力特性、幕墙安装方式和幕墙动力特性等因素,既能直接用于幕墙设计<sup>[13]</sup>,又能用于拟合反映幕墙系统受到的楼面波的频谱特性、有效峰值和持续时间的加速度时程,用于幕墙的模拟地震振动台试验.

### 1.2 位移作用

幕墙系统受到的位移作用为主体结构相邻楼层对应安装位置的层间相对位移,包括幕墙平面内位移(平行于幕墙面板,包括水平向( $y$ 向)和竖向( $z$ 向))和幕墙平面外位移(垂直于幕墙面板),由于幕墙系统平面内刚度远大于平面外刚度,在相同位移角作用下,幕墙平面内产生的力要远大于平面外产生的力,因此分析时仅考虑幕墙系统受到的平面内位移作用<sup>[7]</sup>.

主体结构层间相对位移反应时程为

$$u_n(t) = |u_i(t) - u_{i-1}(t)| \quad (2)$$

式中: $u_n(t)$ 为第 $i$ 层层间相对位移反应; $u_i(t)$ 为幕墙对应主体结构第 $i$ 层安装位置处楼面位移反应; $u_{i-1}(t)$ 为幕墙对应主体结构第 $i-1$ 层安装位置处楼面位移反应, $i \geq 2$ .

其对应的层间最大位移角为

$$\theta_i = \frac{|u_n|_{\max}}{h_{i-1}} \quad (3)$$

式中: $\theta_i$ 为第 $i$ 层层间最大位移角; $|u_n|_{\max}$ 为第 $i$ 层层间最大位移反应; $h_{i-1}$ 为第 $i-1$ 层的层高.

幕墙受到的位移作用受到场地条件、地震输入、主体结构的特性以及幕墙安装方式等因素的影响,且主体结构输入幕墙系统的相对位移即为幕墙系统发生的位移反应,因此需采用具有包络意义的层间相对位移反应 Fourier 幅值谱对幕墙的位移反应进行分析.

## 2 地震作用再现振动台多模式试验

### 2.1 多维地震作用再现振动台多模式试验方法

由幕墙地震作用机理可知,地震作用下幕墙的加速度反应和位移反应的机理不同,试验框架无法同时再现反映频谱、持时特性的加速度作用和平面内相对位移作用,因此需采用多模式加载试验方法,再现幕墙试件受到的多维地震作用。

幕墙受到的三向加速度作用,通过模拟地震振动台和试验框架再现,输入波形为拟合楼面加速度反应谱的时程曲线,试验框架的自振频率宜大于输入台面的加速度时程主要作用频段;同时通过设置位移加载装置实现幕墙平面内位移作用的再现。

### 2.2 试验单元及安装方式

某复杂高层建筑外幕墙采用分区吊挂式幕墙,其支承结构由竖向吊挂支承体系和水平向支承体系组成(图 2):在竖向,通过均匀布置的吊杆将幕墙体系吊挂于加强层;在水平向,通过均匀布置的径向支撑将幕墙体系与主体结构普通层相连,竖向吊挂系统和水平向支撑通过环梁构成整体幕墙支承体系。

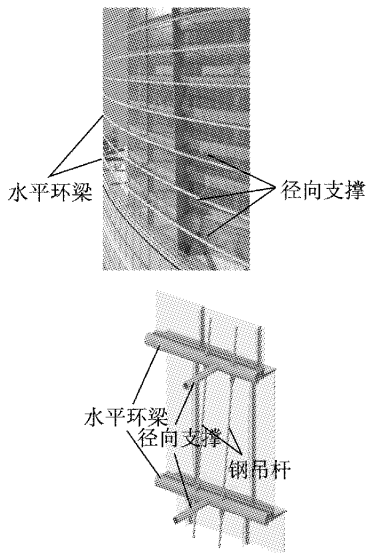


图 2 分区吊挂式建筑幕墙支承系统

Fig. 2 Support system of zonal hanging architectural curtain wall

根据主体结构和幕墙体系的动力分析,可知该分区吊挂式幕墙支承体系在地震作用中基本保持完好,因此,试验时选择幕墙单元作为试验对象,并对两种规格的幕墙单元足尺模型进行试验,尺寸分别为  $4\,500\text{ mm} \times 1\,970\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ (单元 1)和  $4\,300\text{ mm} \times 1\,320\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ (单元 2),幕墙单元振动台

试验布置如图 3 所示。

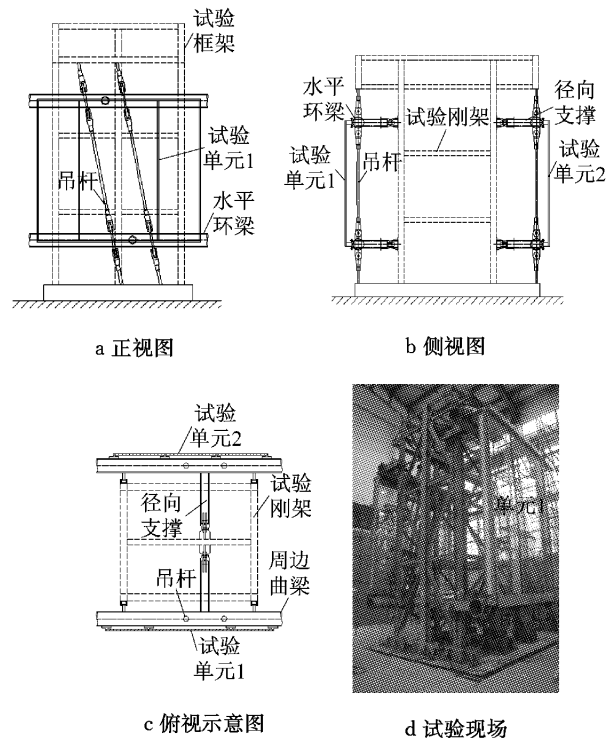


图 3 建筑幕墙模拟地震振动台试验布置  
Fig. 3 Shaking table test arrangement for curtain wall specimens

### 2.3 幕墙单元地震作用分析

#### 2.3.1 主体结构地震输入

如第 1 节所述,幕墙通过支承体系依附于主体结构,在地震中受到主体结构楼面输入的多维地震作用。为探讨主体结构的楼面地震反应,采用 SAP2000 软件对主体结构进行有限元建模分析,其中框架和桁架采用梁单元,楼板和混凝土核心筒采用板壳单元模拟,幕墙的等效质量分别施加在相应的楼层的边缘和顶冠上,并制作了 1/50 的振动台缩尺主体结构模型,如图 4 所示。

根据我国抗震规范<sup>[8]</sup>要求,最终选取了多条天然波和人工波用于试验和软件分析,典型地震波的基本信息<sup>[6]</sup>见表 1。输入上海人工波 SHW3 时,分别沿水平方向、竖直方向单向输入;输入其他波时,加速度峰值按  $1:0.85:0.65$  的比例三向同时输入,分别以不同的水平分量作为输入主向。

#### 2.3.2 幕墙单元加速度作用

##### (1) 水平向加速度作用

由于该建筑主体结构平面基本对称,两个水平方向的地震作用机理相同,且主体结构的各普通楼层和加强层的水平地震作用机理相同,因此,根据软件分析和振动台试验结果,提取不同水准地震作用

下各加强层幕墙单元与支撑结构连接处的加速度时程作为幕墙单元的水平向加速度输入进行反应谱分析,其中水平向加速度作用包络值见表 2。

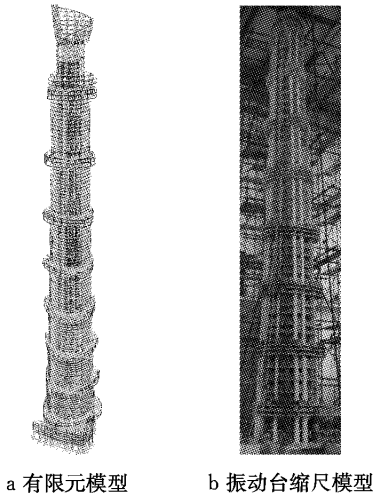


图 4 主体结构有限元和振动台缩尺模型

Fig. 4 Finite element model and shaking table test scaled model of the main structure

表 1 典型地震波基本信息

Tab.1 Basic information of typical seismic waves

地震波	分量	备注
墨西哥城地震波	MEX006	N00E
	MEX007	N90E
	MEX008	竖向分量
博雷戈山地震波	US1213	竖向分量
	US1214	南北分量
	US1215	东西分量
人工波	S79010	水平分量
	S79011	水平分量
	S79012	竖向分量
上海人工波	SHW3	水平分量

(2) 竖向加速度作用

该幕墙体系在竖向通过均匀布置的吊杆吊挂于加强层,地震作用通过加强层吊挂点输入幕墙体系,因此,需构建各区幕墙系统的 SAP2000 有限元模型(图 5)对幕墙竖向地震作用进行分析。

表 2 幕墙地震作用包络值

Tab.2 Envelope values of earthquake actions on the curtain walls

		7 度多遇	7 度基本	7 度罕遇
加速度/ $g$	水平向	0.18	0.49	1.03
	竖向	0.15	0.42	0.91
平面内水平位移/mm (位移角)		9.0 (1/500)	16.6 (1/272)	56.3 (1/80)
单元 1 吊杆内力/kN	最大	252.2	329.6	482.2
	最小	170.2	83.0	0
单元 2 吊杆内力/kN	最大	310.0	405.9	588.5
	最小	208.8	101.2	0

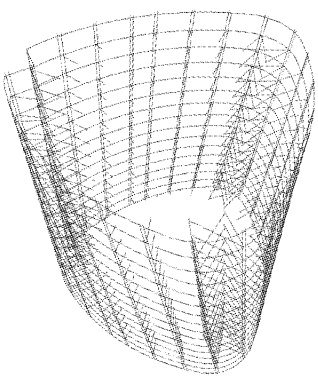


图 5 典型区幕墙体系模型三维示意图

Fig.5 Three dimensional views of curtain wall system in typical hanging zones

提取主体结构振动台试验和有限元分析中加强层吊挂点位置处的楼面波输入幕墙有限元模型,进行弹性时程分析。然后提取幕墙系统各层曲梁与幕墙单元连接点处的竖向加速度反应(为简化工作量,每区只在底部、中部和顶部各选取一层曲梁与幕墙单元的连接点),用于幕墙单元竖向加速度反应谱分析,不同水准地震作用下输入幕墙单元的竖向加速度作用包络值见表 2。

对输入幕墙单元的各条水平向和竖向加速度时程,按照第 1.1 节所述方法进行反应谱分析,得到相应的包络反应谱,并结合本工程特点进行修正,得到相应的楼面加速度目标反应谱。然后将反应谱转化成功率谱,通过傅里叶逆变换拟合相应的加速度时程曲线,用于振动台输入,如图 6 所示<sup>[6]</sup>。

2.3.3 幕墙单元平面内位移及吊杆内力作用

由于试验室现有试验设备的限制,在进行幕墙单元振动台试验时,无法实现幕墙单元受到的位移作用的实时加载,因此试验中采用静力分级加载的方式对其进行位移加载。又因为该幕墙系统受到的平面内竖向位移较小,试验时无法保证加载精度,因此通过控制幕墙体系竖向吊杆内力实现竖向位移的加载。基于以上各因素,试验时该幕墙单元在不同水准地震作用下输入幕墙单元的平面内水平位移角和吊杆内力的取值为主体结构软件分析和振动台试验的包络值,见表 2。

2.4 多模式加载

试验加载装置由钢结构主框架、水平相对位移加载装置和吊杆内力加载装置组成,能同时实现幕墙加速度时程作用再现、平面内水平向相对位移和吊杆内力的逐级加载,再现原理如图 7 所示。设计完成的钢框架的一阶自振频率为 8.68 Hz,大于加速度包络谱的主要作用频率范围(1.25~5Hz),能较好

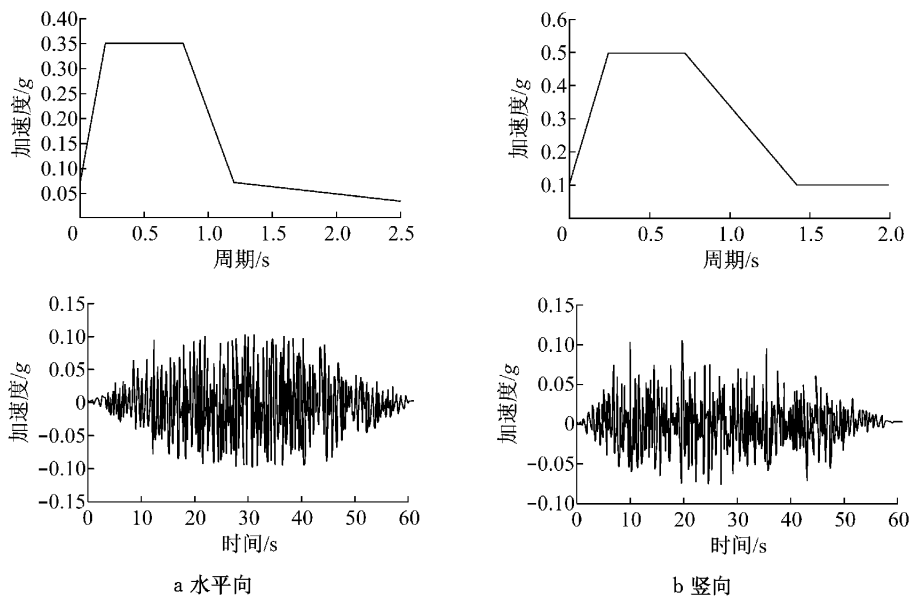


图 6 水平向和竖向加速度反应谱及波形

Fig. 6 Acceleration envelope spectrum and synthetic accelerograms in horizontal and vertical directions

地再现幕墙单元受到的加速度作用,同时有利于幕墙单元平面内相对位移作用的再现。

加载时,首先通过加载装置按照相应的地震作用水准施加水平位移和吊杆内力,再进行相应的加速度作用加载。

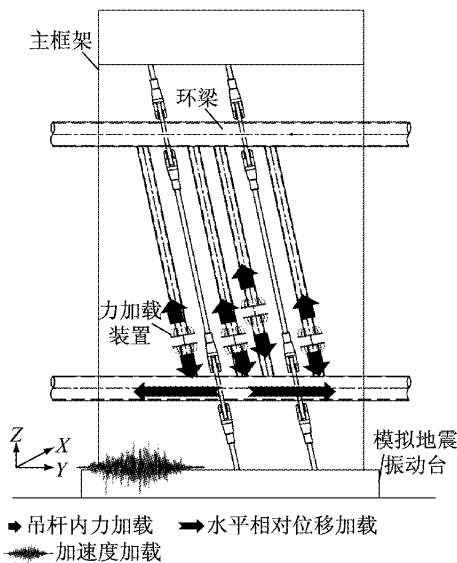


图 7 多维地震作用多模式再现

Fig. 7 Multi-modal reproducing method of multi-dimensional seismic actions on architectural curtain-walls

试验中三向加速度由三向六自由度模拟地震振动台再现,吊杆内力和平面内水平位移由位移加载装置通过等效静力逐级加载的方式来实现。不同水准地震作用下,输入台面的加速度时程、水平位移角的峰值取表 2 中的包络值,吊杆内力只输入表 2 中 7 度罕遇水准下自重和地震作用的最小和最大组合值。

### 3 地震作用再现及抗震性能分析

#### 3.1 多模式加载再现幕墙单元地震作用

由第 2.3.2 节可知,输入幕墙单元的加速度作用为幕墙体系环梁处的加速度反应,因此试验加载时应保证试件安装环梁处加速度反应与目标值相符,而振动台试验时,加速度波形由台面输入,环梁处再现的加速度波形与台面输入波形存在一定的差异。为保证环梁处加速度波形的再现,在正式试验之前通过预试验对输入台面的波形进行滤波调整,滤波采用 STEX Pro 数据采集处理系统。

正式试验结束后,提取环梁处各方向加速度时程进行反应谱分析,并与目标反应谱对比,环梁处再现的加速度反应谱基本覆盖了目标反应谱,保证了输入幕墙单元的加速度波形再现。图 8 为 7 度基本地震作用下试验单元 1 环梁处再现的加速度时程反应谱。

由表 3—4 中幕墙单元各地震水准下,环梁处加速度峰值、上下环梁 Y 向水平相对位移和吊杆内力峰值的实测值和地震作用包络值对比,可知试验有效地再现了幕墙单元受到的三向加速度、平面内水平位移和吊杆内力作用峰值特性。

因此,本文建议的幕墙多维地震作用多模式加

载试验方法,能有效地再现幕墙受到的多维加速度作用的频谱特性和峰值特性,同时实现了幕墙受到的位移作用的逐级加载。

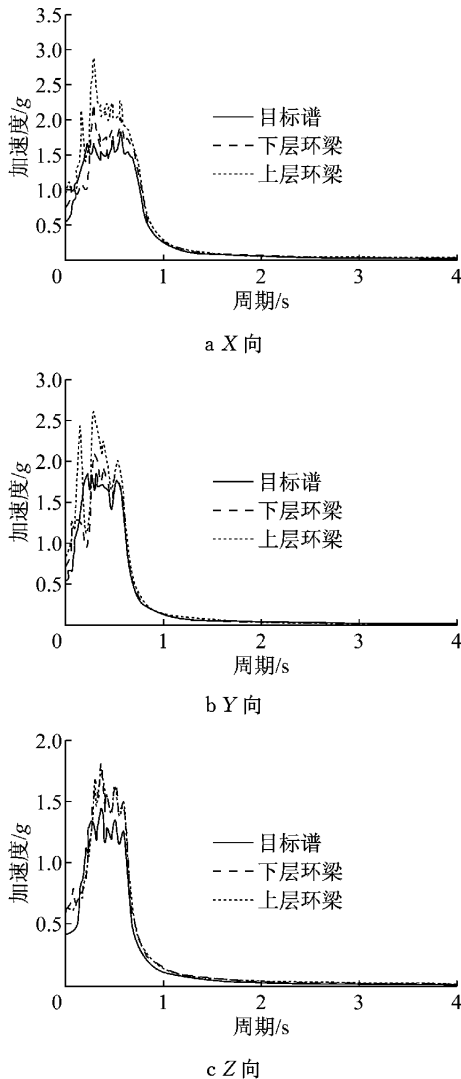


图 8 单元 1 环梁加速度反应谱与目标谱的对照(7 度基本地震)

Fig. 8 Comparison between acceleration response spectrum and the target response spectrum on hoop ring girt of Unit 1 (precautionary earthquake of intensity 7)

3.2 幕墙单元抗震性能评价

试验过程中各工况下玻璃面板中心加速度峰值和加速度放大系数(玻璃面板中心加速度峰值与输入主体结构的地面地震波峰值的比值)见表 5。在动力荷载作用下,该幕墙单元玻璃面板在地震中受到加速度作用得到了明显的放大且加速度放大倍数最大达到 16.3 倍,远大于现行规范<sup>[1]</sup>规定的玻璃面板地震作用放大系数 5.0。

试验过程中各工况下玻璃面板平面内相对位移

峰值及层间位移角(按上下曲梁间的层间位移差计算)见表 6,幕墙试件受到的最大层间位移角为 1/69,大于现行规范<sup>[1]</sup>规定值(幕墙结构的层间变形性能应大于主体结构最大弹性层间位移角的 3 倍,该主体结构最大弹性层间位移角为 1/272),因此按现行规范<sup>[1]</sup>对该幕墙单元进行抗震设计偏于不安全。

表 3 环梁处加速度峰值和上下环梁 Y 向水平相对位移峰值  
Tab.3 Peak accelerations of hoop ring girt and the peak drifts of upper and down hoop ring girt

			7 度 多遇	7 度 基本	7 度 罕遇
加速度 /g	单元 1 实测值	X	0.26	0.77	1.46
		Y	0.21	0.59	1.50
		Z	0.19	0.60	1.07
	单元 2 实测值	X	0.27	0.69	1.34
		Y	0.21	0.61	1.56
		Z	0.20	0.62	1.07
	包络值	X 和 Y	0.18	0.49	1.03
		Z	0.15	0.42	0.91
水平相 对位移 /mm (位移角)	单元 1		11.0 (1/410)	22.0 (1/205)	60.8 (1/74)
	单元 2		11.0 (1/410)	21.0 (1/214)	65.2 (1/69)
	包络值		9.0 (1/500)	16.5 (1/272)	56.3 (1/80)

表 4 吊杆内力峰值

Tab.4 Peak internal force response of sag rods

			单元 1	单元 2
7 度 罕遇	最大 值/kN	实际值	563.8	629.1
		包络值	482.2	588.5
	最小 值/kN	实际值	-49.7	-9.3
		包络值	0	0

表 5 玻璃面板加速度反应

Tab.5 Acceleration responses of the glass panels

吊杆内力		吊杆内力为零			吊杆内力最大		
台面 加速度		7 度 多遇	7 度 基本	7 度 罕遇	7 度 多遇	7 度 基本	7 度 罕遇
平面内相 对位移包 络值/mm (位移角)		9.0 (1/500)	16.5 (1/272)	56.3 (1/80)	9.0 (1/500)	16.5 (1/272)	56.3 (1/80)
加速度峰值/g(加速度放大系数)							
X	单元 1	0.57 (16.3)	1.34 (13.4)	2.24 (11.2)	0.45 (12.9)	1.29 (12.9)	1.99 (10.0)
	单元 2	0.44 (12.6)	1.12 (11.2)	2.24 (11.2)	0.40 (11.4)	1.17 (11.7)	2.12 (10.6)
Y	单元 1	0.28 (8.0)	0.82 (8.2)	1.57 (7.9)	0.27 (7.7)	0.85 (8.5)	1.57 (7.9)
	单元 2	0.32 (9.1)	0.85 (8.5)	1.44 (7.2)	0.19 (5.4)	0.60 (6.0)	1.09 (5.5)
Z	单元 1	0.24 (6.9)	0.61 (6.1)	1.22 (6.1)	0.16 (4.6)	0.57 (5.7)	1.16 (5.8)
	单元 2	0.29 (8.3)	0.69 (6.9)	1.13 (5.7)	0.15 (4.3)	0.64 (6.4)	1.16 (5.8)

由表 3、表 5—6 可知,玻璃幕墙地震反应不仅与场地条件、地震输入、主体结构动力特性有关,还与幕墙系统安装方式、幕墙系统自振频率、阻尼比等因素有关,因此现有规范<sup>[1]</sup>对不同幕墙体系采用统一的评价指标,具有一定的局限性,如何设置更为合理的指标有待进一步探讨。

表 6 玻璃面板平面内相对位移反应

Tab.6 Drift responses of glass panels

吊杆内力	吊杆内力为零			吊杆内力最大		
台面 加速度	7 度 多遇	7 度 基本	7 度 罕遇	7 度 多遇	7 度 基本	7 度 罕遇
平面内相对位移峰值/mm(位移角)						
包络值	9.0 (1/500)	16.5 (1/272)	56.3 (1/80)	9.0 (1/500)	16.5 (1/272)	56.3 (1/80)
单元 1	11.0 (1/409)	22.1 (1/204)	60.8 (1/74)	9.0 (1/500)	22.1 (1/204)	60.8 (1/74)
单元 2	11.0 (1/409)	21.0 (1/214)	65.2 (1/69)	10.0 (1/450)	22.1 (1/204)	65.2 (1/69)

试验过程中,幕墙试件发生的损坏情况如下:7 度多遇地震作用下,幕墙单元没有出现明显的错动和变形,各连接件完好;7 度设防地震作用下,相邻单元之间出现轻微错动,个别螺栓垫片变形;7 度罕遇地震作用下,相邻单元之间的错动增加,部分连接件松动、磨损,连接节点未出现严重破坏。因此该幕墙单元抗震性能满足要求。幕墙构件部分破坏情况如图 9 所示。

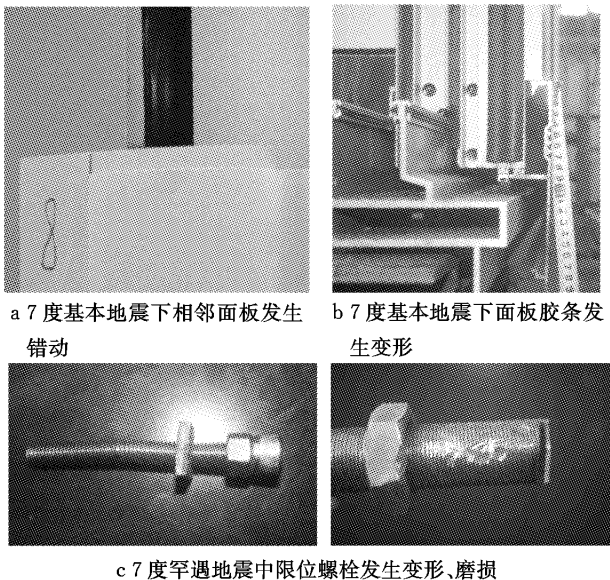


图 9 试验中典型破坏模式

Fig.9 Typical damage patterns of the curtain wall specimens

## 4 混合模拟方法探讨

由幕墙地震作用机理分析可知,幕墙同时受到

安装位置处输入的楼面加速度( $\ddot{u}(t)$ )和层间相对位移( $u_{ri}(t)$ )作用,且二者作用机理不同,因此,有必要探讨多模式加载实时混合模拟试验方法。

多模式加载实时混合模拟,通过结合模拟地震振动台与动态加载作动器,对幕墙试件进行多模式实时加载,动态再现了幕墙受到的多维地震作用。与已有实时杂交振动试验<sup>[14-15]</sup>(real-time hybrid vibration experiment, RHVE)不同,该方法以幕墙系统或幕墙单元为试验对象,无需设置计算子结构,通过多模式实时加载再现幕墙受到的多维地震作用,加载系统如图 10 所示。

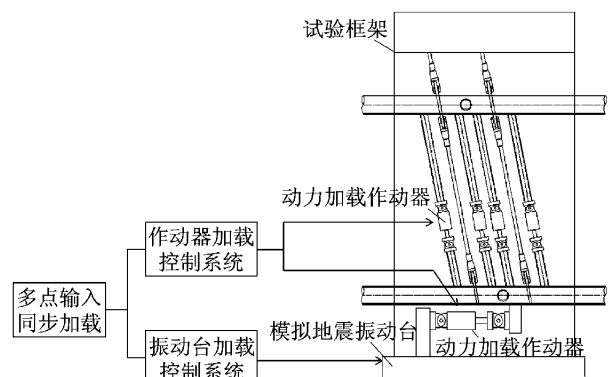


图 10 建筑幕墙实时混合模拟加载系统示意图

Fig. 10 Schematic diagram of real-time hybrid simulation loading system on architecture curtain wall

试验中通过振动台和试验框架再现幕墙加速度作用,通过动态加载作动器对幕墙试件进行平面内位移加载,考核幕墙试件在加速度和位移动态耦合作用下的抗震性能。试验中要求试验钢架的刚度足够大,实现加速度作用再现的同时保证钢架本身的位移反应足够小;实现幕墙试件平面内位移加载的作动器采用位移控制模式,输入的位移时程曲线由主体结构层间位移反应 Fourier 幅值包络谱进行傅里叶逆变换获得。

## 5 结论

在建筑玻璃幕墙抗震性能分析和模拟地震振动台试验研究的基础上,探讨了考虑幕墙多维地震作用再现的模拟地震振动台多模式加载试验方法,并进行了试验验证。主要结论如下:

- (1) 建筑玻璃幕墙受到主体结构传来的地震作用为多维加速度作用和位移作用;
- (2) 针对某复杂建筑主体结构特性和外层吊挂

式玻璃幕墙支承结构特性,设计和制作了安装在振动台上的多模式加载装置,完成对该玻璃幕墙多维加速度和位移作用再现,验证了该方法的有效性和可行性;

(3) 通过分析该幕墙试件模拟地震振动台试验结果,对其抗震性能进行了有效评价;并与现有规范有关参数的限值进行对比,说明应用现有规范对该幕墙体系进行抗震设计偏于不安全;

(4) 实现幕墙多维地震作用,为实时混合模拟再现更加有效的研究方法,值得进一步探讨。

**致谢:** 本文得到了上海中心大厦建设发展有限公司、同济大学建筑设计研究院、沈阳远大铝业工程有限公司和同济大学土木工程防灾国家重点实验室的大力支持。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国建设部. JGJ102—2003 玻璃幕墙工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.  
Ministry of Construction of the People's Republic of China. JGJ102—2003 Technical code for glass curtain wall engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.
- [2] 中国工程建设标准化协会. JGJ133—2001 金属与石材幕墙工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.  
China Engineering Construction Standardization Association. JGJ 133—2001 Technical code for metal and stone curtain walls engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.
- [3] 中国工程建设标准化协会. CECS 127:2001 点支式玻璃幕墙工程技术规程[S]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2001.  
China Engineering Construction Standardization Association. CECS127:2001 Technical specification for point supported glass curtain wall [S]. Beijing: China Engineering Construction Standardization Association, 2001.
- [4] 卢文胜, 黄宝锋, 曹文清. 建筑幕墙振动台试验方法研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2008(4): 447.  
LU Wensheng, HUANG Baofeng, CAO Wenqing. Study on shaking table methods for vibration testing of architectural curtain-walls[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008(4): 447.
- [5] LU Wensheng, HUANG Baofeng, CHEN Shiming. analysis and experimental approaches on seismic performance of architectural curtain walls[C]//Center for Urban Earthquake Engineering Tokyo Institute of Technology. Tokyo: Tokyo Institute of Technology, 2010:1299-1306.
- [6] 李世成, 卢文胜, 黄宝锋. 某高层建筑吊挂式玻璃幕墙地震作用分析与验证[J]. 结构工程师, 2013(1): 76.  
LI Shicheng, LU Wensheng, HUANG Baofeng. Analysis and verification on earthquake actions to hanging glass curtain walls of a high-rise building [J]. Structural Engineers, 2013(1): 76.
- [7] 黄宝锋, 卢文胜, 曹文清. 建筑幕墙抗震性能指标探讨[J]. 土木工程学报, 2009(9): 7.  
HUANG Baofeng, LU Wensheng, CAO Wenqing. Discussion on the seismic performance indices of architectural curtain walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2009(9): 7.
- [8] 中华人民共和国国家标准. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
National Standards of the People's Republic of China. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [9] 郝进锋, 李艳秋, 刘艳晖, 等. 基于建筑性能的非结构构件抗震设计研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006(3): 63.  
HAO Jinfeng, LI Yanqiu, LIU Yanhui, et al. Study on earthquake-resistant design of nonstructural components on the basis of construction performance[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006(3): 63.
- [10] Chaudhuri S R, Gupta V K. A response-based decoupling criterion for multiply-supported secondary systems [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002(8): 1541.
- [11] Hadjian A H, Ellison B. Decoupling of secondary systems for seismic analysis [C]//ASME Pressure Vessel and Piping Conference. San Antonio: American Society of Mechanical Engineers, 1984: 78-85.
- [12] Igusa T, Der Kiureghian A. Dynamic characterization of two-degree-of-freedom equipment-structure systems[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111(1): 1.
- [13] 曹丽娜, 卢文胜, 黄宝锋, 等. 某高层建筑玻璃幕墙地震作用探讨[J]. 结构工程师, 2010, 26(6): 142.  
CAO Lina, LU Wensheng, HUANG Baofeng, et al. Study on earthquake actions to glass curtain walls of a high-rise building [J]. Structural Engineers, 2010, 26(6): 142.
- [14] 邱法维. 结构抗震实验方法进展[J]. 土木工程学报, 2004(10): 19.  
QIU Fawei. Development of seismic testing methods for structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2004(10): 19.
- [15] Keiichi Tamura, Hiroshi Kobayashi. Real-time hybrid vibration experiments with a 2-degrees-of-freedom model [C]//Joint Meetings of the US-Japan Cooperative Program in Natural Resources Panel on Wind and Seismic Effects. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology Special Publication (NIST), 1998: 41-49.