

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221208002

建筑幕墙振动台试验框架设计方法研究*

邱 铭^{1,2}, 付相球², 曹 原³, 王俊洋¹, 刘 昊¹, 张浩波²

(1. 中国建筑科学研究院有限公司建筑安全与环境国家重点实验室,北京 100013; 2. 中国建筑科学研究院有限公司建科环能科技有限公司,北京 100013; 3. 中国建筑科学研究院有限公司建研院检测中心有限公司,北京 100013)

摘要: 建筑幕墙振动台试验中通常采用试验框架模拟承载幕墙的主体结构,幕墙试件的动力反应和变形依赖于试验框架。为满足幕墙试件的试验要求,基于有限元分析提出了一种试验框架设计方法。该方法首先根据幕墙试件的尺寸和试验预期的台面加速度及层间位移角,设计初始的试验框架模型;然后,建立初始试验框架和幕墙试件的整体有限元模型,由整体模型两个平面方向的基频构建系统瑞利阻尼矩阵,形成试验模型的等效计算模型;最后,通过有限元分析模拟振动台试验的加载,根据计算结果与试验预期指标调整确定试验框架的设计参数,直至满足试验要求。在此基础上,以一个玻璃-石材复合幕墙为例设计了相应的试验框架,进行了振动台试验。结果表明,幕墙试件的层间位移角和台面加速度指标均能满足试验要求,验证了试验框架设计方法的合理性。随着地震动输入幅值的增大,幕墙试件层间位移角呈现非线性增大现象。与此同时,试验过程中幕墙面板、连接件和支承构件均未发生损坏,满足工程抗震设计要求。

关键词: 建筑幕墙; 振动台试验; 试验框架; 有限元; 层间位移角

中图分类号: TU398 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)03-0543-07

Research on Design Method of Test Frame for Building Curtain Wall in Shaking Table Tests

QIU Ming^{1,2}, FU Xiangqiu², CAO Yuan³, WANG Junyang¹, LIU Hao¹, ZHANG Haobo²

(1. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. Jianke EET Co., Ltd., China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 3. CABR Testing Center Co., Ltd., China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: Test frames are often used to simulate the main structure to support the curtain wall in shaking table tests of building curtain walls. Besides, there is a strong correlation of the dynamic response and deformation between the test frame and the curtain wall. To satisfy the test requirements, a design method for test frame was proposed in this paper based on finite element simulation. In this method, the initial test frame was designed according to the dimensions of the curtain wall, the expected table acceleration, and inter-story drift angle firstly. Subsequently, a comprehensive finite element model of the initial test frame and the curtain wall was established, and the Rayleigh damping matrix was constructed from the fundamental frequencies of the two plane directions of the model, forming an equivalent calculation model. Finally, the design parameters of the test frame were adjusted until the

* 收稿日期:2022-12-08;修回日期:2023-03-13

作者简介:邱铭(1980—),男,高级工程师,硕士。主要从事建筑环境方面的研究。E-mail: qiuming@cabr-betc.com

通讯作者:付相球(1994—),男,工程师,博士。主要从事幕墙结构安全方面的研究。E-mail: fuxiangqiu@cabr-betc.com

test requirements were met, according to the comparison between the calculation results and the expected test indicators. On this basis, a test frame was designed for a glass-stone composite curtain wall to execute shaking table test. The test results show that the inter-story drift angle of the curtain wall and top acceleration of the table can satisfy the test requirements, which verifies the rationality of the design method of test frame. With the increase of the input amplitude of ground motion, the inter-story drift angle of the curtain wall shows a nonlinear increasing. At the same time, the panels, connectors and supporting members of curtain wall were not damaged during the test, which meeting the requirements of the seismic design of the project.

Keywords: building curtain wall; shaking table test; test frame; finite element; inter-story drift angle

0 引言

得益于建筑幕墙的功能多样性和设计美观性,大部分高层、重要标志建筑都会采用幕墙作为外围护结构。强震作用下,幕墙的支承结构、挂装结构和饰面材料易损坏甚至脱落,震害调查结果显示,幕墙脱落形成的高空坠物是危害城市人民生命安全的重要因素^[1-2],同时幕墙的损坏也导致了巨大的经济损失。因此,建筑幕墙的抗震性能研究非常迫切,也很有必要,而模拟振动台试验是进行结构抗震分析最有效的方式,国家标准规范^[3]中明确规定了四类情况下的幕墙应进行振动台抗震性能试验或其他可行的验证试验。

作为非结构构件,建筑幕墙的振动台试验需借助于试验框架,模拟安装幕墙试件的主体结构。试验中,除了要求试验框架应具有合适的刚度和承载能力外,还需要满足幕墙层间位移角设计要求和依据抗震设防烈度确定的台面加速度要求^[4],而试验过程中作为附属结构的幕墙试件的变形依赖于试验框架,因此,如何合理设计试验框架使两种试验指标都达到要求是试验能否顺利的关键。

王翠坤等^[5]以钢筋混凝土作为试验框架,对外挂玻璃幕墙、石材幕墙及铝板幕墙进行了振动台试验,为保证幕墙试件达到指定的层间位移角,试验过程中钢筋混凝土框架需要进入塑性状态。相比之下,钢结构由于其允许更大的变形而得到更广泛的应用。陈盈等^[6]采用钢结构框架对某石材幕墙进行了振动台试验,试验结果表明,台面加速度峰值达到1.5g时幕墙试件仍未出现严重的破坏情况,事实上,由于试验钢框架刚度太大,此时幕墙平面内层间位移角不到1/1 000,难以满足幕墙的变形要求。而一般振动台系统加载能力有限,难以在幕墙

试件位移角未达到指标时持续大幅提高台面输入地震波振幅,同时过大的加速度反应引起的惯性力同样可能使试件破坏,此时无法检验幕墙在模拟地震中的变形能力。卢文胜等^[7]考虑到振动台系统能力限制,改用共振拍波方法进行激励,使幕墙单元产生足够大的变形,该方法的不足之处是无法考虑地震波的频谱特性。刘栋等^[8]、李世成等^[9]和任祥香等^[10]通过振动台提供加速度,附加位移加载装置提供位移角,进行了幕墙的模拟振动台试验。该方法将加速度与位移的加载分离,可以避免两者不协调的问题,然而也提高了试验的难度和成本。事实上,对于大部分的幕墙试件,钢结构框架可以同时满足加速度和位移角的要求^[11-12],关键在于试验前合理的试验框架设计。

为研究试验框架的设计方法以满足试验要求,本文在有限元模拟的基础上,提出了一种试验框架设计方法。该方法首先建立模拟试验框架和幕墙试件的等效有限元计算模型,根据模型的动力分析结果与试验预期指标调整试验框架的设计参数。最后,以一个玻璃-石材复合幕墙的振动台试验为例,验证了试验框架设计方法的合理性,可供类似的试验和工程参考。

1 试验框架设计方法

1.1 设计思路

试验框架的合理设计是幕墙振动台试验顺利完成的关键,传统的方法是根据幕墙试件的尺寸,依据经验搭建一个钢结构框架,然后根据设计的情况进行加载。试验过程中该方法可能面临两类问题,第一是试验框架设计太柔,台面地震波未达到设计要求,而层间位移角已经达到,此时如继续加载幕墙可能因变形超限而损坏,无法检验其抵抗地

震惯性力的能力;第二,试验框架设计太刚,台面加速度已经远远超过设计加速度,层间位移角仍未达到要求,此时如继续加载,幕墙试件也可能由于惯性力引起的内力过大而损坏,无法检验其变形能力。因此,为顺利进行幕墙振动台试验,有必要在试验之前对试验框架与幕墙试件的整体模型进行分析,合理设计试验框架。为研究合理的试验框架设计方法,提出如图1所示的设计思路,可以分为以下步骤:

(1) 通过幕墙试件的尺寸和预期需要达到的台面加速度 a 及层间位移角 θ ,设计一个初始的试验框架模型,此时试验框架的长宽高基本确定。

(2) 根据初始框架模型,建立有限元模型,将幕墙试件的质量合理分配到试验框架支承幕墙的部位,通常为梁或柱。

(3) 对整体模型进行模态分析,确定幕墙平面内和平面外方向的一阶自振频率,通过两个固有频率值确定瑞利阻尼参数,形成试验模型的等效计算模型。

(4) 对等效计算模型输入峰值加速度为 a 的试验地震波,进行时程反应分析,计算试验框架的最大层间位移角 θ_{max} 。

(5) 对比最大层间位移角 θ_{max} 和预期层间位移角 θ ,当 θ_{max} 略大于 θ 时,说明设计的试验框架基本满足试验要求,其中 θ_{max} 建议可取 $\theta \sim 1.5\theta$ 。

(6) 当 θ_{max} 过大时,应适当加大试验框架梁、柱的截面尺寸,或增设斜撑等构件,增大试验框架的水平刚度;当 θ_{max} 过小时,应适当减小试验框架梁、

柱的截面尺寸,减小试验框架的水平刚度,或通过配重块调整试验框架的自重;对于这两种情况,重新回到步骤(4),直到计算的层间位移角满足要求。

1.2 预期试验指标

幕墙试件的平面内层间位移角是其在振动台试验中最重要的参数指标,《建筑幕墙抗震性能振动台试验方法》^[4]4.3.2条款规定模拟试验框架应具有合适的刚度和承载能力,在试验过程中宜保持弹性状态,并能满足幕墙层间位移角设计要求。对于该设计要求,《建筑幕墙》^[3]5.1.6.2条款中对平面内变形性能规定,在抗震设计时,指标值应不小于主体结构弹性层间位移角控制值的3倍,并给出了对应的主体结构弹性层间位移角限值。因此,试验过程中预期的幕墙试件平面内层间位移角可以通过主体结构的弹性层间位移角限值确定。

相比于层间位移角,目前规范对试验过程中幕墙试件所应达到的峰值加速度的规定并不明确,也存在一些争议^[13-14]。《建筑幕墙》^[3]5.1.6.3条款规定对有抗震设防要求的建筑幕墙,其试验样品在设计试验峰值加速度条件下不应发生破坏。然而,对设计的试验峰值加速度并没有明确的规定。《玻璃幕墙工程技术规范》^[15]对垂直于玻璃幕墙平面的分布地震作用标准值和平行于玻璃幕墙平面的集中水平地震作用标准值,在水平地震影响系数最大值的基础上,增加了动力放大系数,并建议可取5.0,与《金属与石材幕墙工程技术规范》^[16]中的规定基本一致。此处的动力放大系数是考虑了楼面放大效应的影响,而实际上许多研究表明,对于高层建筑,楼层的动力放大系数可能超过5.0,甚至超过10.0^[10],对于幕墙试件的加速度指标,该如何考虑所处不同楼层的影响仍存在讨论的空间。

黄宝锋等^[14]采用楼层高度归一化提出了改进的加速度放大系数,刘栋等^[8]和李世成等^[9]采用数值分析的楼面加速度包络值,生成相应的反应谱,进而得到输入的地震波。《建筑幕墙抗震性能振动台试验方法》^[4]建议依据主体结构与幕墙试件模型理论计算的弹性和非弹性地震反应情况,确定分级次数及对应的台面加速度幅值,并宜覆盖多遇地震、设防烈度地震和预估罕遇地震相对应的加速度幅值。该方法可以考虑不同楼层的影响,然而大大增加了计算和试验难度,工程中应用亦存在困难。因此,常规的振动台试验通常只要求幕墙试件层间

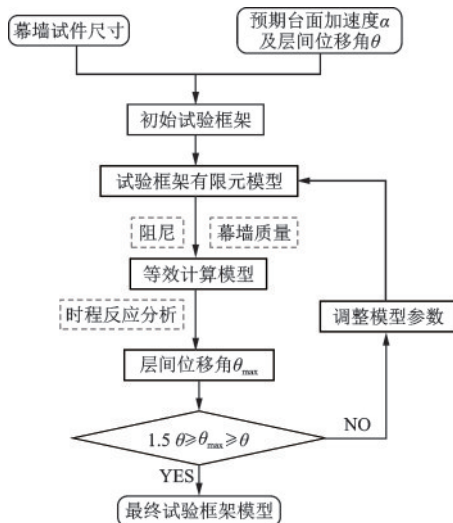


图1 试验框架设计路线

Fig.1 Design flow chart of the test frame

位移角达到设计要求,同时台面加速度峰值覆盖所在地区的设防烈度下的罕遇地震加速度幅值。

1.3 幕墙试件与试验框架的有限元模拟

1.3.1 幕墙试件的等效

幕墙试件通常包括面板、龙骨(支承框架)及连接件等,结构动力计算时将各个部分充分考虑较复杂,也没有必要,相比于试验框架结构,幕墙试件作为附属的非结构构件,其对整体模型的水平刚度影响相对较小,因此可以通过荷载等效将幕墙试件简化为重力荷载或者质量块,附加于试验框架之上。其中荷载等效的方式与幕墙支承的方式有关,对于干挂幕墙,可以将幕墙的重量分配到各个支承挂点,作用到承载的框架梁或柱。

1.3.2 阻尼模型

动力计算需要考虑结构的耗能,工程中钢结构的阻尼比通常取2%,试验样品为钢结构和幕墙试件共同组成,由于幕墙试件的连接件较多,一定程度上增加了振动过程中的摩擦阻尼,根据过去的振动台试验经验^[12],试验框架设计阶段,阻尼比可取2%~4%。对于试验框架与幕墙试件组成的整体模型,结构振动模态以一阶为主,因此模型阻尼矩阵可以通过瑞利阻尼构造,其中瑞利阻尼的两个参考频率可取幕墙平面内和平面外方向的一阶自振频率,由此通过下式计算整体模型的阻尼^[17]:

$$[c] = \alpha[m] + \beta[k] \quad (1)$$

$$\alpha = \zeta \frac{4\pi f_x f_y}{f_x + f_y} \quad (2)$$

$$\beta = \zeta \frac{1}{\pi f_x + \pi f_y} \quad (3)$$

式中, $[c]$ 、 $[m]$ 、 $[k]$ 分别为整体模型的阻尼、质量和刚度矩阵; α 、 β 分别为质量和刚度相关的瑞利阻尼常数; f_x 、 f_y 分别为整体模型在幕墙试件平面内和平面外方向的一阶自振频率; ζ 为整体模型的阻尼比。

1.3.3 约束条件

振动台试验过程中,试验框架通常采用螺栓连接的方式固定在台面,该类连接方式允许节点存在一定的转角,因此在有限元模拟中,可以等效为铰接约束。对于试验框架柱与梁的连接部分,通常存在螺栓连接、焊接以及螺栓连接与焊接结合的方式,其中螺栓连接同样可以等效为铰接,焊接以及螺栓连接与焊接结合的方式,可以等效为刚接。

根据以往的试验经验,由于振动引起的螺栓、

连接件松动,试验前后模型的自振频率存在一定程度的降低,而有限元计算过程中未考虑该因素,由此一般而言试验结果的变形相对计算结果偏大。因此,当计算结果达到预期层间位移角时,试验结果通常也能,所以计算最大层间位移角 θ_{max} 建议可取 $\theta \sim 1.5\theta$ 。

2 某玻璃-石材复合幕墙振动台试验

2.1 试验简介

为验证试验框架设计方法的合理性,针对某工程的玻璃-石材复合幕墙,应用所提方法设计试验框架并进行了振动台试验。试验样品为相同的两幢足尺玻璃-石材复合幕墙,该幕墙高5 890 mm,宽度为4 485 mm。石材主要有30 mm和40 mm厚度花岗岩两种;玻璃型号为HS10+1.9PVB+HS10(三银Low-e)+12A+TP12超白半钢化夹胶中空玻璃,玻璃高3 100 mm,宽2 000 mm。该幕墙试件预期达到的层间位移角为1/150,设计的分级加载步骤见表1,试验中最大台面加速度为0.62g。

表1 试验分级加载工况

Table 1 Loading conditions of tests

工况	1	2	3	4	5	6	7
设防烈度	8度多遇	7度设防	8度设防	7度罕遇	9度设防	8.5度罕遇	9度罕遇
加速度幅值/g	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.51	0.62

输入地震波采用El Centro波、人工波和Taft波,其中0.1g幅值下的三条地震波时程如图2所示。该试验在中国建筑科学研究院建筑安全与环境国家重点实验室的建筑抗震实验室完成,试验振动台台面尺寸为6 m×6 m,承载能力60 t,倾覆力矩180 t·m,最大位移±25 cm,振动台工作频率0.1~50 Hz,最大加速度为±1.5g,最大速度为±125 cm/s。

2.2 试验框架设计

根据图1中的设计思路,设计了支承幕墙试件的试验框架,其有限元模型如图3所示,其中模型长4.7 m(幕墙平面内方向),宽4 m(幕墙平面外方向),高6.45 m。梁、柱均采用H250 mm×250 mm×

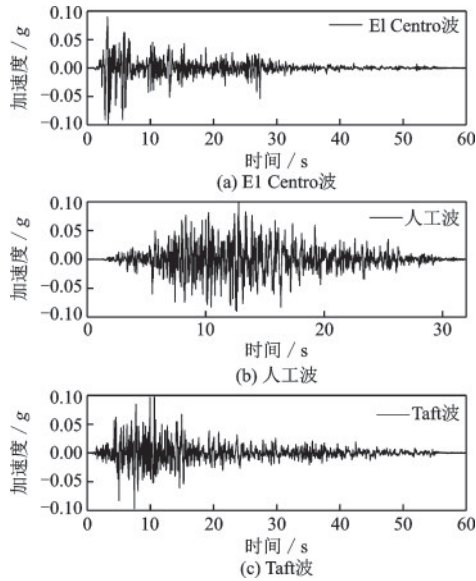


图2 地震波时程曲线

Fig.2 Time history of seismic waves

9 mm×14 mm的型钢,为方便试验框架的安装及提高模型的整体稳定性,上下平面设置∠80 mm×80 mm×6 mm角钢作为斜撑。考虑到幕墙试件的尺寸和安装方便,试验框架承载幕墙的两个平面上下分布设置4根H250 mm×250 mm×9 mm×14 mm支承幕墙梁,支承幕墙梁与框架柱通过螺栓连接。

单榀幕墙与支承的龙骨总重量约为2 000 kg,通过质量等效的方式平均分布到4根支承幕墙梁,简化为等效计算模型。试验框架梁与柱之间采用刚性连接,支承幕墙梁与柱、柱脚与台面采用铰接的方式模拟。有限元建模时,梁、柱和斜撑都采用Beam188梁单元,通过模态分析得到等效计算模型的两个水平方向的一阶自振频率分别为3.5 Hz与3.8 Hz,整体模型的阻尼比取3%,进而通过式(2)、(3)计算得到模型的质量与刚度相关的瑞利阻尼常

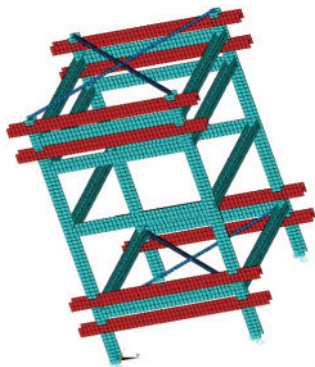


图3 试验框架有限元模型

Fig.3 Finite element model of the test frame

数 $\alpha = 0.69$ 、 $\beta = 1.31 \times 10^{-3}$,由此通过式(1)形成整体模型的阻尼矩阵。

忽略幕墙试件与支承幕墙梁之间的微小相对位移,采用顶层支承幕墙梁与底层支承幕墙梁的相对位移计算幕墙试件的层间位移角。通过时程反应分析得到最大台面加速度0.62g下,El Centro波、人工波和 Taft 波输入时的层间位移角分别为1/112、1/148和1/121,均大于设计要求的1/150,说明该试验框架符合所提的设计要求。

2.3 试验结果分析

通过振动台试验,得到9度罕遇地震台面峰值加速度为0.62g时,El Centro波、人工波及 Taft 波输入下,幕墙试件的顶部位移 u_{up} 、底部位移 u_{down} 以及层间位移角 θ 分别如图4~6所示,不同工况下幕墙试件的层间位移角如图7所示。

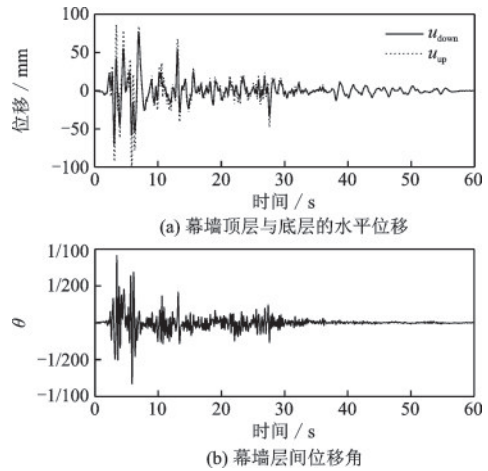


图4 El Centro波输入下试验结果

Fig.4 Test results under El Centro wave input

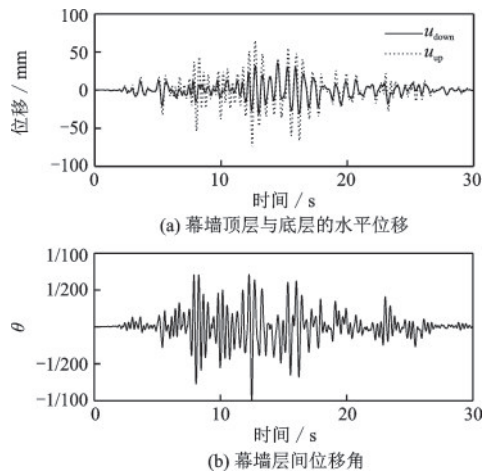


图5 人工波输入下试验结果

Fig.5 Test results under artificial wave input

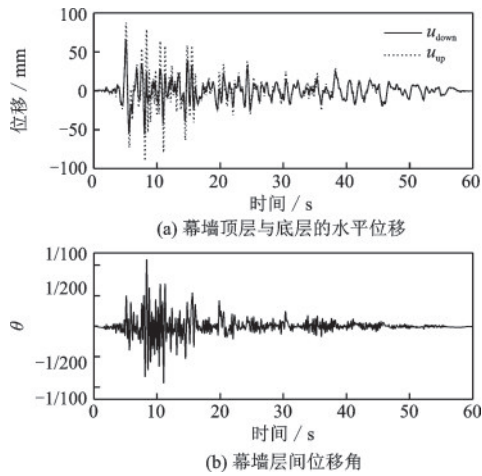


图6 Taft波输入下试验结果

Fig.6 Test results under Taft wave input

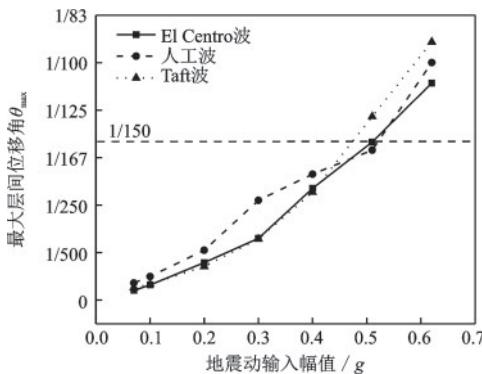


图7 不同工况下幕墙试件的最大层间位移角

Fig.7 Maximum inter-story drift angles of the curtain wall of different cases

由试验结果可以看出,(1)试验过程中三条地震波输入下,幕墙试件的最大层间位移角均达到设计要求的1/150,同时试验加载工况的台面加速度峰值在设计范围之内,说明了模拟试验框架设计的合理性;(2)由不同幅值地震波输入下试验样品的层间位移角变化规律可以看出,随着地震动幅值增大,层间位移角增大,且增大的速率更快,说明层间位移角与台面地震动输入幅值不是线性关系。原因在于随着试验框架和幕墙试件的剧烈振动,部分钢结构的连接部位可能出现螺栓松动现象,导致结构自振频率降低,引起更大的位移反应。与此同时,试验过程中,幕墙面板、连接件和支承构件均未发生损坏,说明幕墙试件符合设计要求。

3 结 语

为合理进行建筑幕墙振动台试验,研究了试验

框架的设计方法,该方法将幕墙试件作为等效荷载施加于试验框架,形成等效计算模型,以幕墙平面外和平面内一阶振动频率为参考频率形成整体模型的阻尼矩阵,基于有限元时程反应分析结果调整试验框架的设计参数。并针对一个玻璃-石材复合幕墙进行了振动台试验,试验结果表明幕墙试件的层间位移角和台面加速度指标均能满足试验要求,验证了试验框架设计方法的合理性。试验过程中幕墙面板、连接件和支承构件均未发生损坏,满足抗震设计要求,可供类似试验参考。

参考文献:

- [1] 黄秋昊,黄盛南,陆新征,等.高层建筑维护结构地震破坏导致次生灾害的初步研究[J].工程力学,2013,30(增):94-98.
Huang Q H, Huang S N, Lu X Z, et al. A primary study on the secondary disasters induced by the damage of high-rise building envelopes under earthquake[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(Sup): 94-98. (in Chinese)
- [2] 高广华,周浩翔,王森,等.地震作用下建筑室外安全距离的界定[J].四川建筑科学研究,2014,40(4):233-237.
Gao G H, Zhou H X, Wang M, et al. The definition of earthquake under the action of building a safe distance from the outside[J]. Sichuan Building Science, 2014, 40(4): 233-237. (in Chinese)
- [3] 建筑幕墙:GB/T 21086—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [4] 建筑幕墙抗震性能振动台试验方法:GBT 18575—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [5] 王翠坤,肖从真,赵西安.幕墙抗震性能试验研究[J].建筑结构,2002,32(9):65-67.
Wang C K, Xiao C Z, Zhao X A. Test study of earthquake-resistant property for curtain wall[J]. Building Structure, 2002, 32(9): 65-67. (in Chinese)
- [6] 陈盈,许乃鑫,张文学,等.石材幕墙结构抗震性能试验研究[J].世界地震工程,2022,38(1):28-36.
Chen Y, Xu N X, Zhang W X, et al. Experimental study on seismic performance of stone curtain wall structure[J]. World Earthquake Engineering, 2022, 38(1): 28-36. (in Chinese)
- [7] 卢文胜,曹文清,杜芳.幕墙抗震性能检验方法探讨[J].结构工程师,2001(1):16-19,44.
Lu W S, Cao W Q, Du F. Discussion on evaluation of seismic resistance of curtain wall[J]. Structural Engi-

- neers, 2001(1): 16-19, 44. (in Chinese)
- [8] 刘栋, 卢文胜, 曹文清. 分区吊挂式建筑幕墙模拟地震振动台试验方法研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(1): 76-82.
Liu D, Lu W S, Cao W Q. Earthquake simulation shaking table test methods for zonal hanging architectural curtain wall[J]. Structural Engineers, 2013, 29(1): 76-82. (in Chinese)
- [9] 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, 29(1): 69-75.
Li S C, Lu W S, Huang B F. Analysis and verification of seismic responses of hanging glass curtain walls of a high-rise building [J]. Structural Engineers, 2013, 29(1): 69-75. (in Chinese)
- [10] 任祥香, 卢文胜, 曹文清. 考虑主体结构地震反应的建筑幕墙振动台试验方法[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增2): 235-240.
Ren X X, Lu W S, Cao W Q. Shaking table test approach for building curtain walls based on the seismic performances of main structure [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(Sup2): 235-240. (in Chinese)
- [11] 卢文胜, 黄宝锋, 曹文清. 背栓式微晶玻璃幕墙振动台试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(1): 59-61, 9.
Lu W S, Huang B F, Cao W Q. Shaking table test of rear bolted micro crystal glass curtain wall[J]. Building Structure, 2010, 40(1): 59-61, 9. (in Chinese)
- [12] 周桂云, 徐跃华, 王明贵. 大型石材幕墙抗震试验研究[J]. 建筑结构, 2003, 33(8): 62-63.
Zhou G Y, Xu Y H, Wang M G. Experimental study on seismic performance of large stone curtain wall [J]. Building Structure, 2003, 33(8): 62-63. (in Chinese)
- [13] 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, 28(4): 447-453.
Lu W S, Huang B F, Cao W Q. Study of shaking table test methods for vibration testing of architectural curtain-walls [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2008, 28(4): 447-453. (in Chinese)
- [14] 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, 42(9): 8-12.
Huang B F, Lu W S, Cao W Q. Discussion on the seismic performance indices of architectural curtain walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 8-12. (in Chinese)
- [15] 玻璃幕墙工程技术规范: JGJ 102—2003 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [16] 金属与石材幕墙工程技术规范: JGJ 133—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [17] Chopra A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering[M]. New Jersey: Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1995.

(本文编辑:池营营)