

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201812027

外挂微晶发泡板轻钢框架结构振动台试验

董宏英¹, 杨林¹, 曹万林¹, 吕晓明², 边瑾靓¹

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京北玻硅巢技术有限公司, 北京 100125)

摘要: 为研究外挂微晶发泡板轻钢框架结构在动力作用下的工作性能,进行了1个2层单跨轻钢框架外挂微晶发泡板足尺模型的振动台试验。试验选取了EL-Centro、Taft、张家口人工波3条地震波,地震加速度考虑8度多遇到9度罕遇。通过分析模型结构的自振周期、刚度、楼层加速度以及楼层位移,研究了外挂微晶发泡板轻钢框架结构的振动特性,对微晶发泡板的工程应用给出了建议。试验研究表明:在9度罕遇地震下,轻钢框架结构与外挂墙板龙骨基本无破坏,仅墙板表皮有脱落现象,部分墙板发生平面外扭转;采用微晶发泡板与框架间相对错动的装配连接方式,可一定程度上减小结构的层间位移;墙板开设较大门窗洞时,该方向刚度虽有较大退化,但在9度罕遇地震作用下无倒塌危险,能够满足大震不倒的抗震设防要求;相邻墙体之间的预留缝需要添加柔性材料改善相邻墙体间的撞击挤压现象。

关键词: 轻钢框架;微晶发泡板;挂板方式;足尺模型;振动台试验

中图分类号: TU392

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)12-0027-08

Shaking table test of a light steel frame structure with micro-crystalline foam plates

DONG Hongying¹, YANG Lin¹, CAO Wanlin¹, LÜ Xiaoming², BIAN Jinliang¹

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing North Glass Sinest Technology Co. Ltd., Beijing 100125, China)

Abstract: In order to investigate the dynamic performance of a light steel frame structure with micro-crystalline foam plates, a shaking table test of a two-story single-span light steel frame with micro-crystalline foam plates was carried out. Three seismic waves, EL-Centro, Taft, and Zhangjiakou artificial wave, were selected in the test. The intensity of seismic ground motion range from 8 to 9 degrees. The structure vibration performance was analyzed through analyzing the structural natural period, stiffness, floor acceleration, and floor displacement. Suggestions for further engineering application of the structure were given. The experimental results show that under the action of seismic intensity of 9 degree, the internal light steel frame and wallboard skeletons were almost undamaged, except for the partial peeling-off of the wallboard skin and the out-of-plane torsion of some wallboards. The connection mode of the micro-crystalline foam plate and the frame could produce relative dislocation, which could reduce the inter-story displacement of the structure to a certain extent. The X-direction horizontal stiffness of the structure had a large degrade. However, there is no danger of collapse under the action of rare earthquake with seismic intensity of 9 degree, which can meet the seismic resistant requirements for large earthquakes. Flexible materials are needed to add to the reserved joints between adjacent walls to improve the impact and extrusion phenomenon between adjacent walls.

Keywords: lightweight steel frame; micro-crystalline foamed plate; hanging plate mode; full-scale model; shaking table test

与混凝土框架结构相比,轻钢混凝土组合框架具有优越的抗震性能。国外学者 Kawaguchi 等^[1]对方钢管混凝土框架、杜国锋等^[2]对圆钢管框架做了大量的试验研究,试验表明钢管混凝土框架是非常好的抗震结构形式;王铁成等^[3]进一步分析了柱长细对方钢管混凝土框架延性的影响;余银银^[4]研究表明钢管再生混凝土柱具有不逊色原生钢管混凝土

柱的耗能能力以及抗侧刚度,表现出良好的抗震性能,具有更好的经济效益、环境效益;钢结构中,外墙所占比例约为70%^[5],通常采用外挂式墙板来提高装配效率,抗震研究重点为挂板与框架的连接形式^[6]。

对于外挂墙板,目前研究最多的蒸压轻质混凝土(ALC)墙板。李国强等^[7]、王雪芹等^[8]、王波等^[9-10]对ALC挂板的抗震性能进行了大量的研究。以玻璃工业废料、粉煤灰^[11]、非金属矿为原料,以碳酸钙^[12]为发泡剂,添加碳化硅^[13]粉末,经过烧结过程制备的微晶玻璃泡沫材料作为一种新型墙板材

收稿日期: 2018-12-07

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD1100903)

作者简介: 董宏英(1966—),女,教授;

曹万林(1954—),男,教授,博士生导师

通信作者: 董宏英, donghy@bjut.edu.cn

料,比目前使用的聚合物泡沫具有更高的机械强度、化学性能和热稳定性^[14-15].微晶发泡板具有轻质、高强、防火、保温、隔音、环保、饰面效果好等优点,可以取得良好社会效益和经济效益^[16-17].

本文作者所在课题组边瑾靛等^[18]对微晶发泡板材料进行了一系列力学性能研究,对微晶发泡板挂板进行了平面外受弯试验、受压试验以及低周往复荷载试验,本文主要在前期研究的基础上,考虑轻钢微晶发泡板的拼装组合方式、墙板与框架的连接形式,进行了外挂微晶发泡板轻钢框架结构振动台试验,为轻钢微晶发泡板幕墙的推广与应用提出设计建议.

1 试验概况

1.1 模型设计及制作

为研究外挂微晶发泡板与轻钢框架在地震作用下的协同工作性能,本试验设计了一个二层单跨钢框架,按照强柱弱梁、强节点弱杆件的设计原则,梁

柱节点为双 L 型加劲肋节点.本文作者所在课题组提出的此轻钢框架在张家口地区进行了大面积的推广与应用.框架平面尺寸为 4.35 m × 4.35 m,柱距 4.2 m,层高 2.7 m.框架柱(KZ)截面尺寸为 150 mm × 150 mm,钢管壁厚 6 mm,内填再生混凝土.框架梁(KL)采用轧制中翼缘 H 型钢 HM194 × 150 × 6 × 9,材料均为 Q235B,模型图见图 1.

框架一层、二层主梁上焊有栓钉,与 70 mm 厚预制再生混凝土楼板预留空洞用高强灌浆料连接.微晶发泡板幕墙与轻钢框架通过预埋在框架梁上的连接件用螺栓连接.微晶发泡板板厚 100 mm,两端内嵌有轻钢龙骨,壁厚 2 mm,板面中间开槽内放 Φ6 钢筋,钢筋两端与轻钢龙骨相连.钢筋开槽处灌注高强灌浆料.结构南面一层和二层采用单块竖板外挂.结构北面一层底部、一层顶部、二层顶部分别采用两块横板拼装、四块竖条板拼装、两块横板拼装.东面、西面一层采用横板、竖板组合拼装,二层采用四块组合竖板拼装.北面、西面幕墙与框架通过螺栓采用固

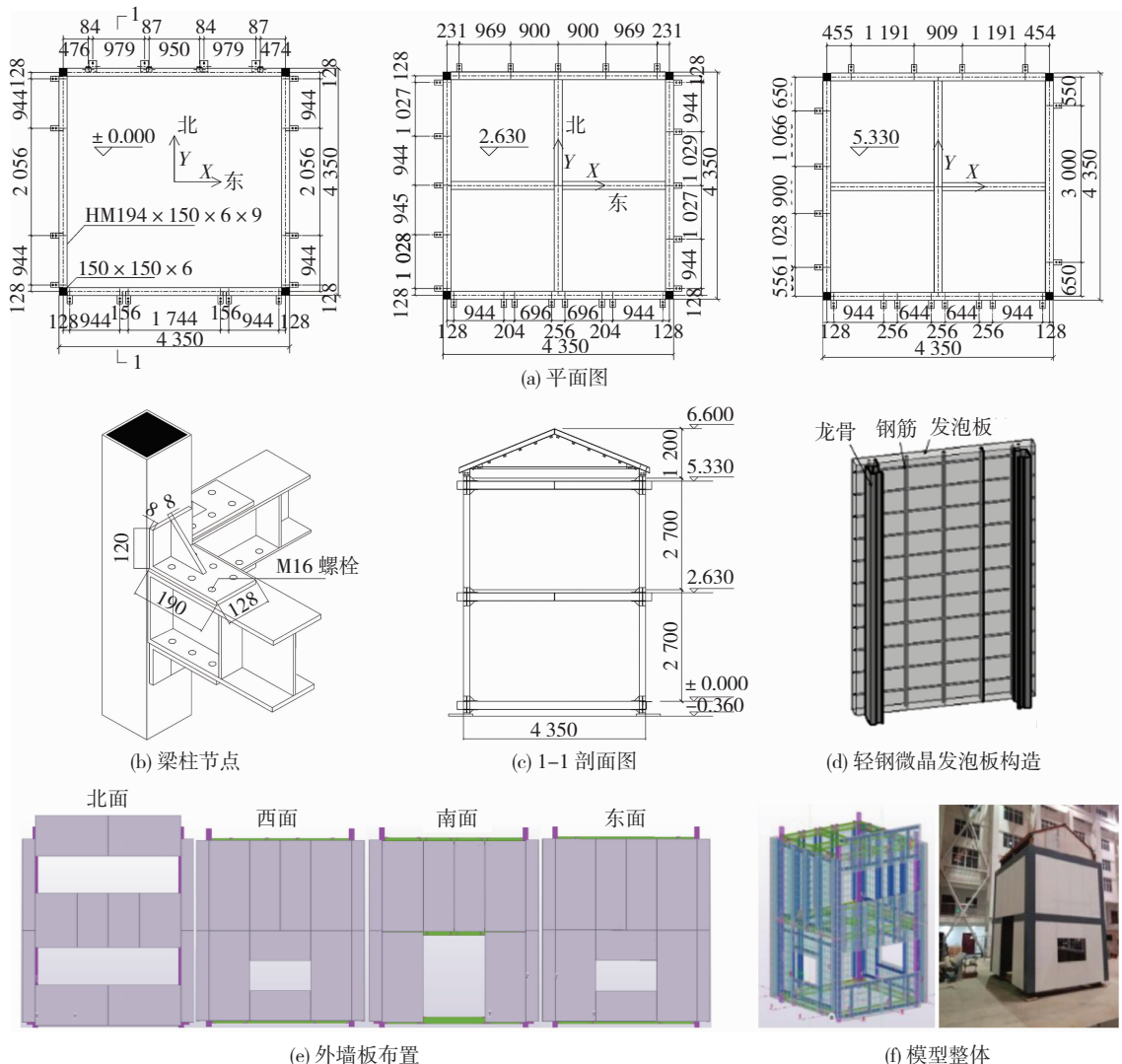


图 1 模型图

Fig. 1 Model diagram

定连接方式. 南面幕墙采用竖向错动连接, 竖条板龙骨与框架梁通过竖向螺栓连接, 竖条板在地震作用下可沿着竖向上承螺栓和下承螺栓与框架产生竖向错动. 东面幕墙与框架采用水平错动连接方式, 墙板下部与框架梁采用螺栓固定连接, 墙板上部横向龙

骨上焊有套筒, 长螺杆一端与套筒相连, 另一端与框架梁相连, 在试验中利用长螺杆的延性从而使墙板与框架产生水平错动. 结构南面、北面墙板强度等级为 A3.5, 结构东面、西面墙板强度等级为 A5.0, 墙板与框架连接方式见图 2.

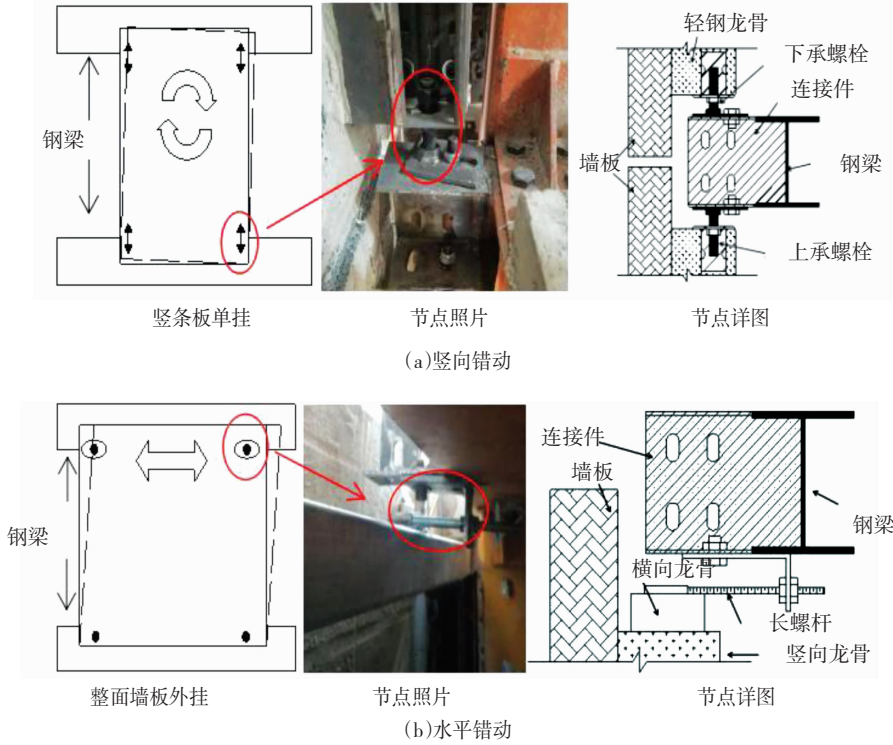


图 2 墙板与框架连接方式

Fig. 2 Connection modes between wallboard and frame

1.2 材料性能

试件所用钢板、钢筋力学性能参数见表 1, 微晶发泡板力学性能参数见表 2. 试验采用的再生混凝土为粗骨料取代率 100% 的再生混凝土, 再生粗骨料物理性能见表 3. 再生混凝土实测立方体抗压强度 29.3 MPa, 弹性模量为 28.9 GPa. 再生混凝土配合比见表 4.

表 1 钢材力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of the steel MPa

钢材	屈服强度 f_y	抗拉强度 f_u	弹性模量 E_s
6 mm 厚钢板	373	444	2.08×10^5
2 mm 厚钢板	273	359	2.08×10^5
$\phi 6$ 钢筋	544	645	2.05×10^5

表 2 微晶发泡板性能

Tab. 2 Properties of micro-crystalline foam board MPa

编号	抗压强度 f_y	抗拉强度 f_u	弹性模量 E_s
A3.5	4.06	0.71	4.05×10^3
A5.0	5.20	0.82	4.49×10^3

表 3 再生粗骨料物理性能

Tab. 3 Physical properties of recycled coarse aggregate

粒径/ mm	表观密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	吸水率/ %	压碎指标/ %	空隙率/ %	针片状颗粒 含量/%
5 ~ 10	2 650	4.45	9.0	48.0	4.0

1.3 试验加载方案

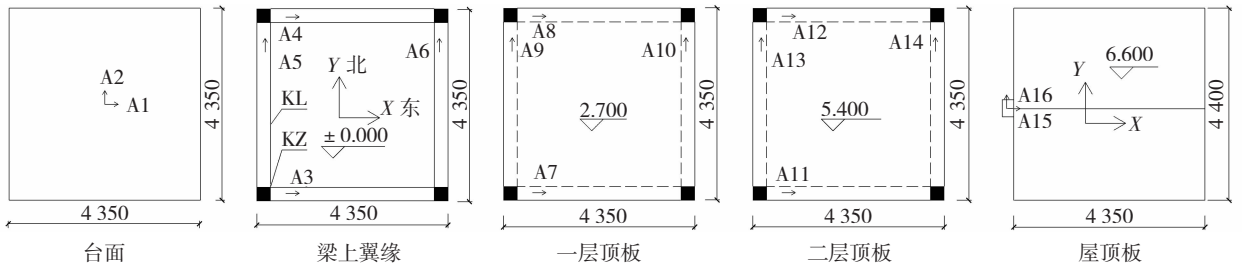
本试验在中国地震局工程力学研究所的恢先地震工程综合实验室进行. 振动台台面尺寸 5 m × 5 m, 承载能力 30 t, 最大行程 ±0.5 m, 最大速度 1.5 m/s, 最大加速度达 2 g.

测点布置: 本试验布置加速度传感器 20 个, 编号 A1 ~ A20. A17 ~ A20 布置在墙板上. 位移传感器 12 个, 标号 D1 ~ D12, D1 ~ D8 测量结构水平位移, D9 ~ D12 测量结构层间位移. 应变 24 个, 布置在西北柱、西南柱、东北柱上, 以西北柱应变测点为例, 编号 WNX1 ~ 4, WNY1 ~ 4, 应变编号中的 X 和 Y 代表结构的 X 向和 Y 向, 图中未标注的应变参照图 3 中西北柱应变的分布. 楼板上布置配重, 布置要求为 100 kg/m², 屋面板配重布置为 50 kg/m².

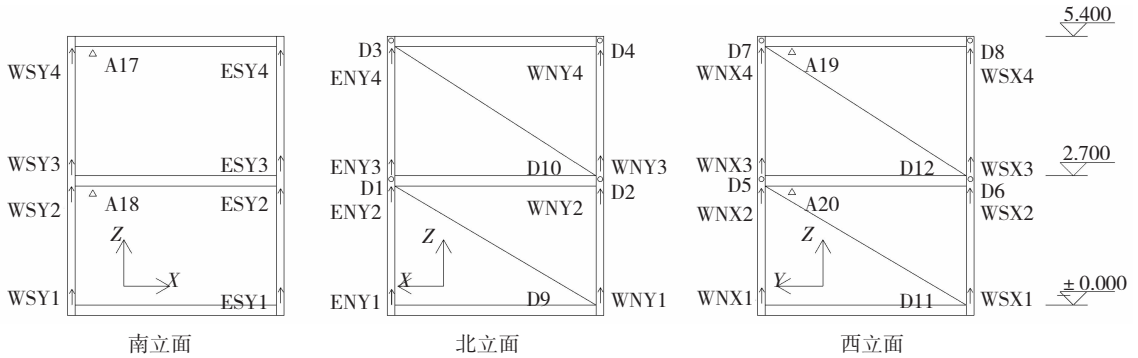
表 4 再生混凝土配合比

Tab. 4 Mix proportions of recycled aggregate concrete

实测立方体抗压强度/MPa	配合比/(kg·m ⁻³)						
	42.5 水泥	矿粉	粉煤灰	再生粗骨料	细砂	减水剂	水
29.3	323.0	70.0	70.0	804.0	825.0	4.3	16.5



(a) 加速度传感器布置



(b) 位移、应变测点布置

图 3 测点布置

Fig. 3 Layout of measuring points

振动台试验工况及顺序:对模型结构输入双向的 EL-Centro 波和 Taft 波,以及单向的张家口人工波(图 4),测定模型结构在 8 度多遇、8 度基本、8 度罕遇、9 度罕遇地震作用下的动力响应。采用白噪声扫频,测定模型结构的动力特性。具体试验工况及顺序见表 5。

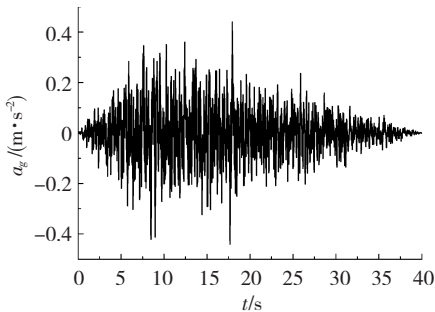


图 4 张家口人工波

Fig. 4 Artificial waves in Zhangjiakou

2 结果及分析

2.1 试验现象

模型结构在刚开始振动时一层的 4 个拐角板晃

动较其他墙板明显。在 0.3 g 地震波作用下,结构的北面柱边拐角板与相邻墙板开始出现碰撞,北面西侧窗角处有局部表面起皮,在 8 度基本地震作用下墙板起皮向下扩展。北面西侧窗角处裂缝向下扩展。北面顶层的墙板有些许平面外旋转。

在 8 度罕遇地震作用下结构的東西两面墙板内侧开始出现细微裂缝,主要分布在龙骨与墙板接触两侧和墙板预埋钢筋槽内。在 0.4 g 地震波作用下,北面一层顶部墙板的西侧板发生平面外旋转,墙板上部外倾,下部内陷。在 0.5 g 地震波作用下北面一层底部、一层顶部墙板发生明显的平面外变形。结构西南角的二层拐角板在振动中晃动明显,振后与相邻墙板间的缝宽明显增大。在 9 度罕遇地震作用下,结构二层西南角的拐角板晃动幅度进一步加大。在整个试验过程中,结构东西两面墙板的整体晃动较南面单块墙板的晃动明显多。东面墙板较西面墙板在振动过程中晃动幅度小,整体性好。结构北面破坏形态见图 5。

表 5 试验工况

Tab. 5 Test load conditions

试验 工况	烈度	地震激励	峰值加速度/g		备注	试验 工况	烈度	地震激励	峰值加速度/g		备注
			X 向	Y 向					X 向	Y 向	
1		第一次白噪声	0.07	0.07	双向	22		第四次白噪声	0.07	0.07	双向
2		EL-Centro	0.07	0.06	双向	23	8	EL-Centro	0.40	0.34	双向
3	8	EL-Centro	0.06	0.07	双向	24	度	EL-Centro	0.34	0.40	双向
4	度	Taft	0.07	0.06	双向	25	罕	Taft	0.40	0.34	双向
5	多	Taft	0.06	0.07	双向	26	遇	Taft	0.34	0.40	双向
6	遇	张家口波	0.07	—	单向	27	1	张家口波	0.40	—	单向
7		张家口波	—	0.07	单向	28		张家口波	—	0.40	单向
8		第二次白噪声	0.07	0.07	双向	29		第五次白噪声	0.07	0.07	双向
9	8	EL-Centro	0.20	0.17	双向	30	8	EL-Centro	0.51	0.43	双向
10	度	EL-Centro	0.17	0.20	双向	31	度	EL-Centro	0.43	0.51	双向
11	基本	Taft	0.20	0.17	双向	32	罕	Taft	0.51	0.43	双向
12	本	Taft	0.17	0.20	双向	33	遇	Taft	0.43	0.51	双向
13	1	张家口波	0.20	—	单向	34	2	张家口波	0.51	—	单向
14		张家口波	—	0.20	单向	35		张家口波	—	0.51	单向
15		第三次白噪声	0.07	0.07	双向	36		第六次白噪声	0.07	0.07	双向
16	8	EL-Centro	0.30	0.25	双向	37	9	EL-Centro	0.62	0.53	双向
17	度	EL-Centro	0.25	0.30	双向	38	度	EL-Centro	0.53	0.62	双向
18	基本	Taft	0.30	0.25	双向	39	罕	Taft	0.62	0.53	双向
19	本	Taft	0.25	0.30	双向	40	遇	Taft	0.53	0.62	双向
20	2	张家口波	0.30	—	单向	41		第七次白噪声	0.07	0.07	双向
21		张家口波	—	0.30	单向						

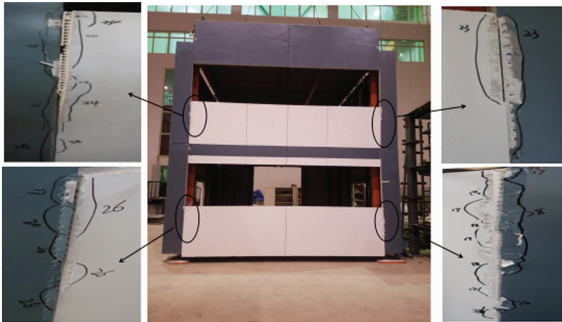


图 5 结构北面破坏形态

Fig. 5 Structural failure form on the north side

2.2 模型结构频率与振型

在不同水准地震作用前后,均用白噪声对振动台试验模型进行扫频.通过对试验模型上布置的各个加速度测点的时程反应、频谱特性进行分析,得出不同强度地震作用前后模型结构 X 向和 Y 向的一阶自振频率,见表 6.

表 6 模型结构自振频率

Tab. 6 Natural frequencies of the model structure Hz

白噪声扫频	X 向一阶	Y 向一阶
空框架白噪声	1.962	1.863
第一次白噪声	1.987	2.273
第二次白噪声	1.916	2.144
第四次白噪声	1.844	2.102
第六次白噪声	1.644	2.102
第七次白噪声	1.544	2.087

通过表 6 中第一次白噪声与空框架白噪声的扫描结果对比显示,模型结构四面挂上墙板后,结构整体刚度略有提高,结构 Y 向刚度提高较 X 向明显.结构 Y 向频率提高 22%. X 向由于门窗洞口较多,频率提高 1.3%,抗侧刚度提高忽略不计.

1)模型结构自振频率随输入地震动幅值的加大而降低,自振周期延长.9 度罕遇地震试验结束后模型的前两阶频率分别降为 1.544(X 向)、2.087(Y 向).频率降低的很小,由于结构没有出现明显损伤,仍处于弹性阶段,墙板与框架采用的是螺栓连接,连接点为非刚性连接,仅接触面产生了微小间隙导致自振频率的轻微降低.

2)模型结构频率是通过加速度作傅里叶变换得到的,模型结构频率反映结构刚度.图 6 是框架外挂墙板后根据每次白噪声扫频结果计算得到的模型结构刚度退化曲线,由图可以看出,工况 22 以前,8 度多遇、8 度基本地震作用下结构 Y 方向刚度退化速率、幅值与 X 方向相近,刚度退化不大,说明结构在 8 度基本地震作用下具有较高的安全性;工况 22 以后模型结构两个方向的刚度退化速率明显不一样,结构 Y 方向的刚度退化缓慢,刚度略有降低,X 方向刚度退化加快,此时结构北面墙板部分发生平面外旋转,抗侧刚度已有显著下降;9 度罕遇地震加载结束进行最后一次白噪声扫频,结构 X 方向刚度降幅为 22.3%,Y 方向刚度降幅为 8.2%,结构没有发生倒塌,仍具有一

定的安全性,满足大震不倒的抗震设防要求.

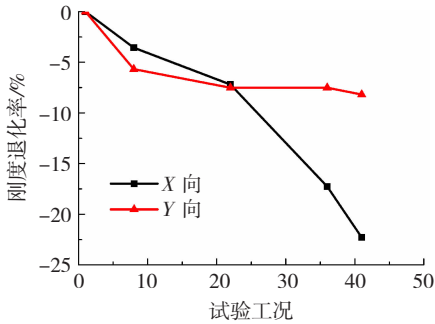


图 6 模型结构刚度退化

Fig. 6 Stiffness degradation curves of the model structure

2.3 相对位移

用 Matlab 软件对加速度时程曲线进行二次积分,得到模型结构各层的位移时程曲线,由模型各层

的位移时程减去台座的位移时程从而得到模型结构的各层相对位移值. 输入的 EL-Centro 波和 Taft 波都是双向地震动,EL-Centro - XY 指以 X 方向为主的 EL-Centro 波,EL-Centro - YX 为以 Y 方向为主的 EL-Centro 波,Taft-XY 与 Taft - YX 同上.

从图 7 可看出,模型结构 X 向相对位移在 EL-Centro 波下最为突出,且 X 向层间位移随楼层增加而减小;Y 向一层相对位移在 Taft 波下较为明显,层间位移随楼层增加而增大. 随着输入地震动幅值的增大,模型结构 X、Y 方向各层相对位移均呈上升趋势,X 方向的位移较 Y 方向更加明显. 这是由于结构 X 向门窗洞口较多,开洞面积大,墙板对框架的刚度贡献较低. 在 9 度罕遇地震(0.62 g)作用下,模型结构 X 方向相对位移呈线性分布.

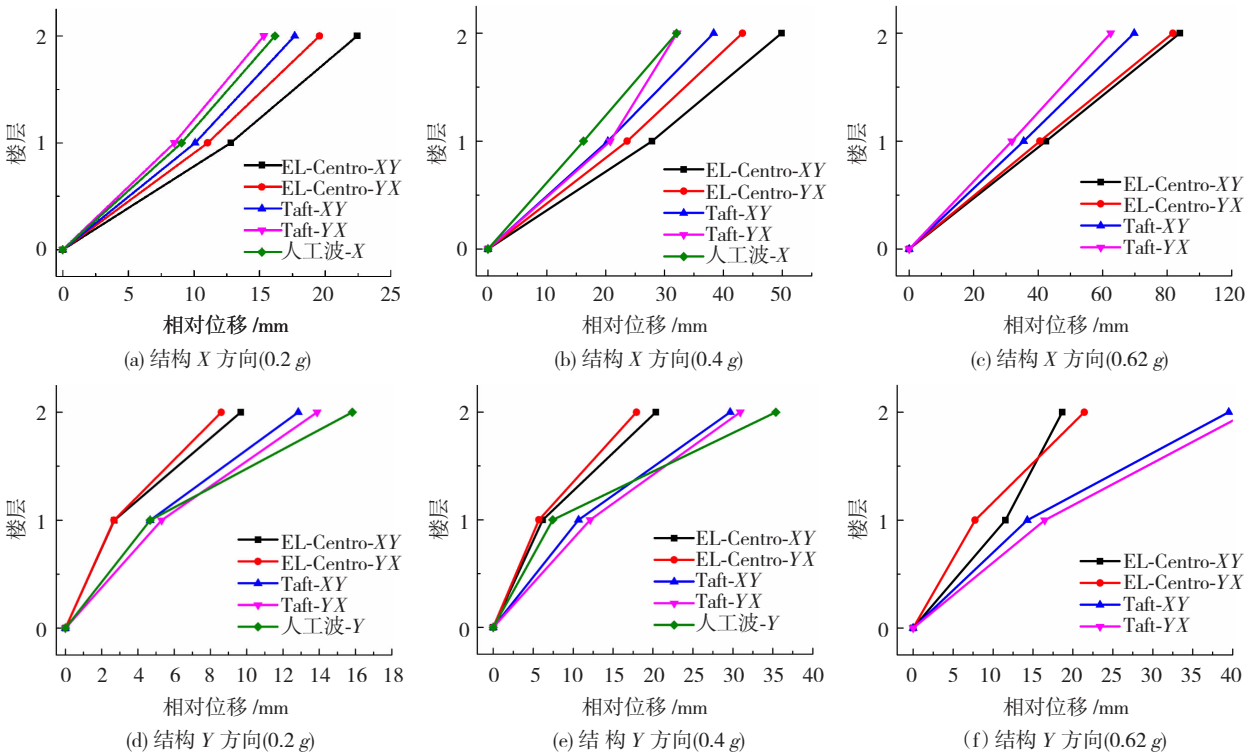


图 7 模型结构相对位移包络图

Fig. 7 Relative displacement envelope of the model structure

2.4 层间位移角

选取从 8 度多遇到 9 度罕遇每个地震作用下最大的层间位移角进行分析. 图 8 显示模型结构在不同的地震作用下,南面的一、二层位移角均小于北面,西面一、二层位移角均大于东面,这是连接方式不同导致的. 东面墙板与框架为水平错动连接,南面为竖向错动连接. 墙板与框架相对错动的装配连接方式可以在一定程度上减小结构的层间位移. 结构 X、Y 方向的层间位移角曲线整体上都随着地震烈度的提高而呈现上升趋势. 在 8 度罕遇地震作用下以后结构西面二层的层间位移角为 0.021,超过 1/50,结构未出现倒塌.

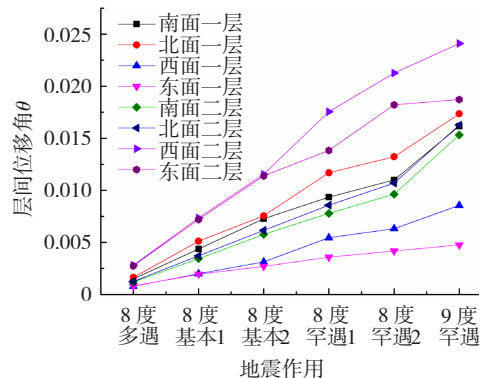


图 8 模型结构最大层间位移角

Fig. 8 Maximum inter laminar displacement angle of the model structure

2.5 加速度放大系数

探究模型结构各层加速度放大系数与楼层高度的关系,将同一工况下结构各层加速度放大系数沿结构高度进行图示,图 9 给出了模型结构在 8 度 (0.3 g)地震 Taft(T)波和 EL-Centro(E)波下各楼层楼板(F)和墙板(W)的加速度放大系数.由图 9 可知,模型结构楼板的加速度峰值出现在结构顶层,加速度放大系数随楼层的增加呈增大的趋势;外挂墙板的动力放大作用明显大于模型结构,且一层墙板的动力放大作用更加明显.

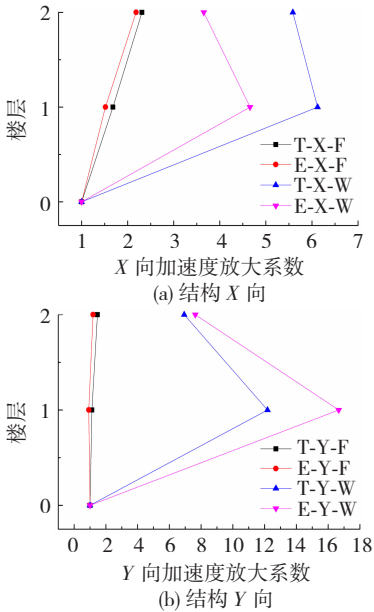


图 9 8 度地震下(0.3 g)模型各层放大系数

Fig. 9 Amplification coefficients of each layer of the model under 8-degree earthquakes

图 10 给出了模型结构在 Taft - XY 波下 2 层楼板和墙板的加速度反应随输入地震强度的变化情况,以此反应模型动力特性随地震强度的衰减和在不同烈度地震荷载下模型的抗震性能.由图 10 可知随地震强度的增长,模型结构 2 层楼板、墙板动力放大作用均呈下降趋势.

2.6 结构应变

通过采集到的柱子上的应变数据评估结构柱子构件的破坏情况.此次试验采集到的应变在每个加载工况前都进行了归零处理,并非实际应变.图 11 仅给出了结构在 9 度罕遇地震作用下测得的结构柱 X、Y 方向应变最大值、最小值,应变符号均以拉为正,压为负.图 11 中贴片位置 1~4 分别对应图 3 中一层柱子底部、一层柱子顶部、二层柱子底部、二层柱子顶部,其中 WSX - 4 应变数据未采集到.

由图 11 可看出,柱子上的应变分布为在柱端大,跨中小,由跨中向两端逐渐增大;在结构 Y 方向,东北柱 Y 向应变小于西北柱上 Y 向应变,墙板与框

架的相对水平错动起了重要的作用,减小了柱子的损伤.在地震作用下墙板与框架采取固定连接方式虽然提高了结构刚度,但对框架的损伤程度更大,柱子其他部位的应变片均处在弹性工作范围内,但是结构 X 向水平刚度发生了较大的退化,主要原因是结构 X 向(北面)墙板与梁之间的连接发生破坏,蒙皮作用减弱,北面墙板发生不同程度的平面外旋转现象,抗侧刚度下降.

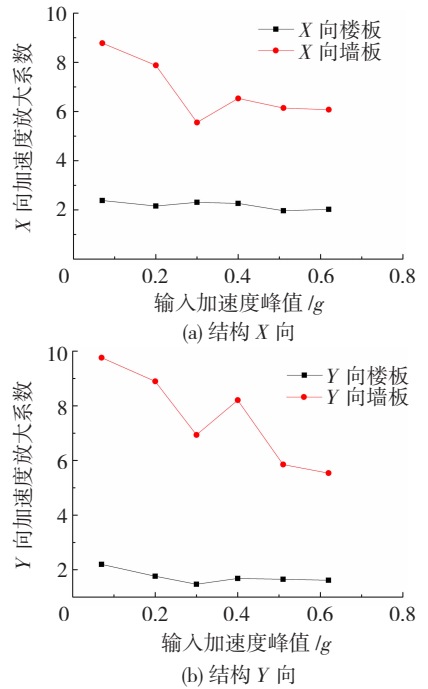


图 10 各加速度峰值下楼板、墙板加速度放大系数

Fig. 10 Acceleration amplification coefficient of floor and wallboard under peak acceleration

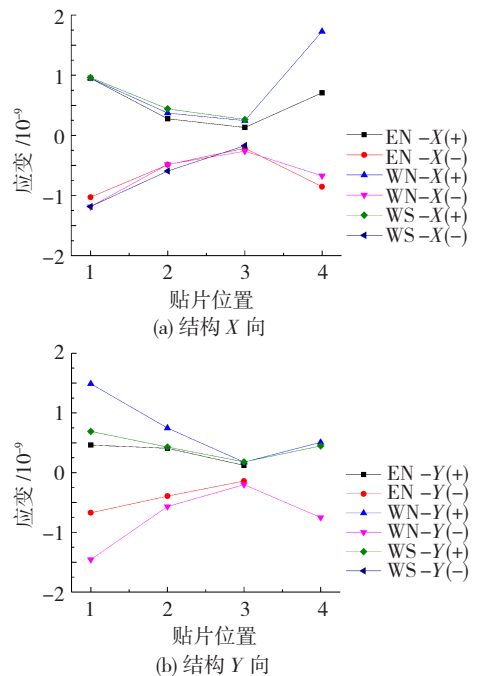


图 11 9 度罕遇地震下测点应变

Fig. 11 Strain values in loading cases corresponding to rare earthquake with seismic fortification intensity of 9 degrees

3 结 论

1) 外挂微晶发泡板轻钢框架结构能够满足 8 度抗震设防地区小震不坏、中震可修、大震不倒的抗震设防要求。

2) 在 9 度罕遇地震下, 墙板没有整体脱落现象, 轻钢框架结构与外挂墙板龙骨基本无破坏, 结构无倒塌危险。

3) 外挂墙板与框架的连接有 3 种, 分别是水平错动连接、竖向错动连接、固定连接, 固定连接固然可以增加结构的整体刚度, 但在地震作用下对结构的损伤也是最大的。采用微晶发泡板与框架间相对错动的装配连接方式, 可一定程度上减小结构的层间位移。

4) 挂板后模型结构 X 向自振频率提高 1.3%, Y 向提高 22%, 门窗洞口对结构自振频率的影响较大。

参 考 文 献

[1] KAWAGUCHI J, MORINO S, SUGIMOTO T. Elasto-plastic behavior of concrete-filled steel tubular frames [C]//Composite Construction in Steel and Concrete III, Proceedings of an Engineering Foundation Conference. Insee, Germany: ASCE, 1997: 281

[2] 杜国锋, 徐礼华, 许成祥, 等. 钢管混凝土框架结构抗震性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(10): 123
DU Guofeng, XU Lihua, XU Chengxiang, et al. Seismic resistance behavior of CFST frame structure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(10): 123

[3] 王铁成, 卢明奇, 张洪波. 柱长细对方钢管混凝土框架延性影响的分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(3): 335
WANG Tiecheng, LU Mingqi, ZHANG Hongbo. Analysis of the effect of slenderness ratio on the ductility of CFRT frames [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(3): 335

[4] 余银银. 钢管再生混凝土柱抗震性能试验研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012
YU Yinyin. An experimental study of the seismic behavior of recycled aggregate concrete filled steel tube columns [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012

[5] 张爱林, 胡婷婷, 刘学春. 装配式钢结构住宅配套外墙分类及对比分析[J]. 工业建筑, 2014, 44(8): 9
ZHANG Ailin, HU Tingting, LIU Xuechun. The classification and comparative analysis of the matching external wall for the prefabricated steel structure residence [J]. Industrial Construction, 2014, 44(8): 9. DOI:10.13204/j.gyjz201408002

[6] 张爱林. 工业化装配式高层钢结构体系创新、标准规范编制及产业化关键问题[J]. 工业建筑, 2014, 44(8): 1
ZHANG Ailin. The key issues of system innovation, drawing up standard and industrialization for modularized prefabricated high-rise steel structures [J]. Industrial Construction, 2014, 44(8): 1. DOI:10.13204/j.gyjz201408001

[7] 李国强, 方明霁, 刘宜靖, 等. 钢结构住宅体系加气混凝土外墙板抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(10): 27
LI Guoqiang, FANG Mingji, LIU Yijing, et al. An experimental

study on the seismic behavior of ALC external wall panels in steel frames [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(10): 27. DOI:10.15951/j.tmgxb.2005.10.005

[8] 王雪芹, 刘学春, 马林, 等. 装配式 ALC 外挂墙板抗震性能试验研究[J]. 钢结构, 2017, 32(4): 26
WANG Xueqin, LIU Xuechun, MA Lin, et al. Experimental research on seismic behavior of prefabricated ALC external panels [J]. Steel Construction, 2017, 32(4): 26. DOI:10.13206/j.gjz201704005

[9] 王波, 王静峰, 王晓倩, 等. 带 ALC 墙板钢管混凝土框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增刊 1): 153
WANG Bo, WANG Jingfeng, WANG Xiaoqian, et al. Experimental study on seismic behavior of concrete-filled steel tubular frames with ALC wall panels [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(S1): 153. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2013.s1.023

[10] 王波, 王静峰, 李响, 等. 填充 ALC 墙板钢管混凝土框架抗震试验与数值模拟[J]. 土木工程学报, 2014, 47(增刊 2): 60
WANG Bo, WANG Jingfeng, LI Xiang, et al. Experiments and analysis of CFST frames with ALC walls under seismic action [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(S2): 60. DOI:10.15951/j.tmgxb.2014.s2.009

[11] CHEN Bo, WANG Keqiang, CHEN Xingjun, et al. Study of foam glass with high content of fly ash using calcium carbonate as foaming agent [J]. Materials Letters, 2012, 79(23): 263. DOI:10.1016/j.matlet.2012.04.052

[12] FERNANDES H R, TULYAGANOV D U, FERREIRA J M F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents [J]. Ceramics International, 2009, 35(1): 229. DOI:10.1016/j.ceramint.2007.10.019

[13] FERNANDES H R, TULYAGANOV D U, FERREIRA J M F. Production and characterisation of glass ceramic foams from recycled raw materials [J]. British Ceramic Transactions, 2009, 108(1): 12

[14] BERNARDO E, CEDRO R, FLOREAN M, et al. Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams [J]. Ceramics International, 2007, 33(6): 963. DOI:10.1016/j.ceramint.2006.02.010

[15] BERNARDO E. Micro-and macro-cellular sintered glass-ceramics from wastes [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2007, 27(6): 2421. DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2006.10.003

[16] 郭宏伟, 高档妮, 高淑雅, 等. 微晶泡沫玻璃的研制及性能研究[J]. 新型建筑材料, 2005(9): 50
GUO Hongwei, GAO Dangni, GAO Shuya, et al. Development of devitrified foam glass and study on its property [J]. New Building Materials, 2005(9): 50

[17] 张欣田. 泡沫玻璃板在建筑节能工程中的应用与实践[J]. 浙江建筑, 2017, 34(6): 46
ZHANG Xintian. Application and practice of the foam glass plate in building energy saving engineering [J]. Zhejiang Construction, 2017, 34(6): 46

[18] BIAN Jinliang, CAO Wanlin, YANG Lin, et al. Experimental research on the mechanical properties of tailing microcrystalline foam glass [J]. Materials, 2018, 11(10): 2048

(编辑 赵丽莹)