外挂模块化节能复合墙板钢框架足尺振动台试验研究

苏佶智[1],张哲畅[2],张戊晨[1],乔文涛[2*],邵 华[3]
(1.国网河北省电力有限公司经济技术研究院,石家庄 050022; 2.石家庄铁道大学 土木工程学院,石家庄 050043; 3.河北汇智电力工程设计有限公司,石家庄 050030)

摘 要: 外挂模块化节能复合墙板兼具保温隔热效果优良、装配效率高效、综合造价低等优点,十分适用于城市小型装配式变电站的外围护墙体。为探究该类墙板与钢框架连接体系的可靠性,本研究制作了单层足尺钢框架外挂模块化节能复合墙板试件,开展了地震模拟振动台试验,研究试件在不同烈度、不同地震波作用下的加速度、位移等动力响应特性。结果表明:钢框架与模块化节能复合墙板协同工作性能良好,墙板可有效提升结构整体刚度;且该复合墙板试件刚度较大,在地震作用下损伤程度较轻,自振频率降幅较小;随地震峰值加速度A的增大,墙板的加速度放大系数呈下降趋势;在8度多遇地震(A=0.07g)至8度极罕遇地震(A=0.60g)作用下,结构的层间位移角均满足规范限值要求;“上拉下托”连接形式不仅连接可靠,还具备一定耗能能力;试验全过程墙板基本处于弹性状态,未出现明显破坏。

关键词: 装配式城市变电站; 模块化; 节能复合墙板; 振动台试验; 钢框架; 地震动力响应; 层间位移角
中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9379(2026)07-0041-08
DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20241219001

Full-Scale Shaking Table Test of a Steel Frame with External Modular Energy-Saving Composite Walls

SU Jizhi[1], *ZHANG Zhechang*[2], *ZHANG Wuchen*[1], *QIAO Wentao*[2*], *SHAO Hua*[3]
(1. State Grid Electric Power Co.,Ltd., Economic and Technological Research Institute, Shijiazhuang 050022, China;
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. Hebei Huizhi Power Engineering Design Co.,Ltd., Shijiazhuang 050030, China)
*Corresponding author: qwt@stdu.edu.cn

Abstract: External modular energy-saving composite walls have the advantages of excellent thermal insulation, rapid and efficient assembly construction and cost-effectiveness, making them especially suitable for the external enclosure walls of small urban prefabricated substations. In order to study the reliability of the connection between this type of wall panel and a steel frame, a one-story full-scale structural model of a steel frame with external modular energy-saving composite wall panels was fabricated. A seismic simulation shaking table test was conducted to investigate its dynamic characteristics, including acceleration and displacement responses under different seismic intensities and seismic waves. The results show that the steel frame and modular energy-saving composite wall panels exhibit good cooperative performance, and the wall panels improve the structural stiffness. The model structure has high stiffness,

收稿日期:2024-12-19
基金项目:河北省杰出青年科学基金(E2022210084),国网河北省电力有限公司科技研发资助项目(河北汇智电力工程设计有限公司,HZHTCG2023-07)
作者简介:
苏佶智(1989—),男,博士,高级工程师,主要从事装配式建筑结构及绿色建造方面的研究。E-mail:sujizhi1989@163.com。
通信作者:
乔文涛(1982—),男,博士,教授,主要从事创新结构与智能建造方面的研究。E-mail:qwt@stdu.edu.cn。

suffers minor damage under seismic loading, and shows a limited reduction in natural frequency. With the increase of A, the acceleration amplification factor of the wall panels shows a downward trend. The inter-story drift ratios of the model under 8-degree frequent earthquakes ($A=0.07g$) to 8-degree extremely rare earthquakes ($A=0.60g$) all meet the code limit requirements. The "upper pulling and lower supporting" connection configuration provides reliable connection while dissipating seismic energy. The wall panels remain basically elastic with no obvious damage.

Keywords: prefabricated urban substation; modularization; energy-saving composite wall; shaking table test; steel frame; seismic dynamic response; inter-story drift ratio

发展装配式绿色建筑是推进建筑工业化、实现建筑节能与碳减排的重要途经。目前变电站建筑多采用装配式钢结构为主、部分装配式混凝土构件为辅的结构形式。装配式钢结构具备自重轻、强度高、抗震性能好、施工便捷、绿色节能等优点，但配套使用的围护墙板仍存在抗火、抗震性能偏弱以及易脱落、保温效果不佳等问题。为提升电力建筑标准化、模块化水平，降低变电站建造及全生命周期能耗与建设成本，亟需研发集保温、承重、防火于一体，且连接可靠的新型外围护外墙体系[1-2]。夹芯复合墙板由外结构层、夹芯层通过抗剪连接件组合而成。与传统墙体相比，夹芯复合墙体在承受荷载的同时，可依靠夹芯层有效阻隔热量耗散、降低能耗[3]。但混凝土结构层刚度偏大，地震作用下墙板往往先于框架发生破坏，因此墙板与框架的连接节点需具备良好的抗震性能，在保证连接稳定性的同时兼顾结构耗能能力。

已有学者针对钢框架-墙板结构的抗震性能开展了大量研究。李国强等[4-5]对配置加气混凝土(ALC)内嵌墙板的钢框架开展了低周往复试验与振动台试验，研究墙板对钢框架结构受力性能及动力特性的影响，结果表明内嵌墙板可显著提升钢框架的承载力与刚度。岳峰等[6]对不同形式的ALC内嵌墙板钢框架进行了足尺振动台试验，证实两类墙板及配套连接件均具有良好的抗震性能，连接件能有效约束墙板位移，提供可靠连接。DU等[7]开展AAC外挂墙板钢框架振动台试验研究，结果表明相较于纯钢框架，设置AAC外墙板可显著提升结构刚度与耗能能力，且内嵌墙板会造成钢框架的刚度退化更为严重。胡精武等[8]研究了内嵌ALC墙板对框架抗震性能的影响，发现预埋式连接节点可有效减轻墙板损伤。

现有研究多聚焦内嵌墙板，未充分考虑墙板对钢框架变形的适应性，也难以满足灵活的空间布置需求。结合建筑节能要求，本文提出一种外挂模块化节能复合墙板钢框架结构[9]。该结构由H型钢框架与全螺栓连接的模块化夹芯复合墙板组成；外挂墙板部分嵌入框架，搭配可滑移连接节点，在提升结构刚度的同时，降低钢框架变形对墙板的不利影响。体系装配全程无湿作业，施工快捷、污染小。为探究该结构在动力荷载下的工作性能与工作机理，本文开展单层足尺振动台试验研究，分析结构在地震作用下的破坏现象与动力响应，为外挂模块化节能复合墙板钢框架结构的抗震设计提供理论依据。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验试件由钢框架和模块化节能复合墙板组成，钢框架及墙板平面布置如图1所示。图1中，北侧与东侧墙板开设窗洞，窗洞尺寸为900 mm×900 mm，窗墙比为0.15。钢框架设计参数见表1。

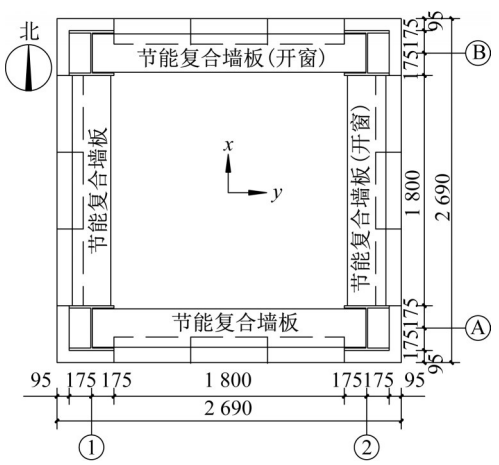


图1 钢框架结构及墙板单元平面布置(单位:mm)

Fig. 1 Plan arrangement of steel frame structure and wall panel element (unit: mm)

表1 钢框架设计参数

Table 1 Design parameters of steel frame

位置	尺寸/mm	高(长)/mm	数量/根
钢柱	HW350×350×12×19	3 500	
1、2轴钢梁	HM400×300×10×16	1 800	4
A、B轴钢梁	HM400×300×10×16	2 138	

钢框架采用不同规格的热轧H型钢梁柱，通过全螺栓连接的梁柱连接节点拼装而成，整体构造如图2所示。图2中钢框架柱轴线间距为2 150 mm，层高为2 940 mm；共布置4根基础梁与4根框架梁。梁柱采用带双腹板角钢的顶底角钢连接，角钢位置设置加劲肋[10]；钢梁上每隔200 mm焊接抗剪栓钉。为实现墙板下部可靠连接，在梁顶部分浇筑150 mm厚混凝土楼(地)板，并预埋

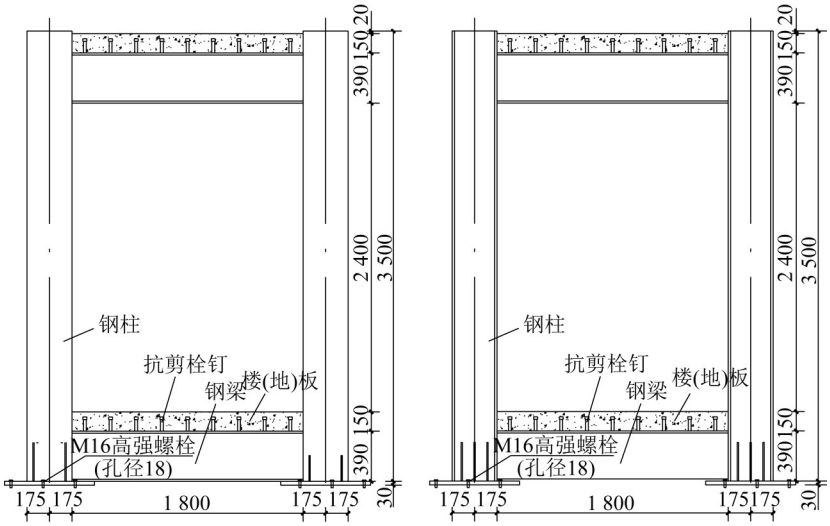


图2　振动台试验钢框架结构构造（单位：mm）

Fig. 2　Steel frame structure construction for shaking table test（unit：mm）

连接螺杆。

模块化节能复合墙板为工厂预制构件，由内外混凝土面层、夹芯保温层与钢丝网架组成。混凝土面层厚度均为50 mm，GEPS保温板厚度为100 mm，墙板总厚度为200 mm，标准板尺寸为0.60 m×2.94 m，开窗区域墙板按洞口尺寸裁切，墙板转角处采用L形角板包覆钢柱。墙板构造及连接形式如图3所示。墙板内置的钢丝网架由直径为2.5 mm的低碳镀锌钢丝加工而成，网格间距为50 mm，斜向钢丝贯穿石墨聚苯保温层并与两侧钢丝网焊接，间距为50 mm，有效保证墙板整体性。混凝土面层采用Lc7.5级轻集料混凝土，可减轻结构自重并具备一定水平、竖向荷载抵抗能力；夹芯保温层采用GD模塑石墨聚苯乙烯泡沫塑料板（GEPS），具有良好的保温性能和抗火性能。墙板上部向外延伸包裹钢梁，可兼作楼板免拆模板，同时强化上部连接。

模块墙顶部设置连接件、底部设置预埋件，墙板采用上拉下托节点与钢梁连接，节点分为上部、下部两部分，如图4所示。上部连接件为角钢，在短肢设置与钢梁长度方向平行的长圆孔，与钢梁栓接，长肢设置与墙板高度方向平行的长圆孔，与墙板螺栓连接；下部连接件采用预埋角钢，角钢短肢预埋入墙板并与内部钢丝网架焊接，长肢外伸开设圆孔，与钢梁螺栓连接，螺栓配套设置弹簧垫片。上部双肢长圆孔的设计可抵消装配误差；地震作用下，角钢可沿长圆孔滑动，配合下部螺栓处弹簧垫片，使墙板产生微小位移，协调墙板与钢框架的变形，降低墙板对框架刚度的不利影响。

试件所用钢材均采用Q235B；梁柱节点使用8.8级M16高强螺栓装配，为实现试件与振动台台面的稳定连接，在柱脚处焊接30 mm厚的锚固钢板，通过8.8级M16

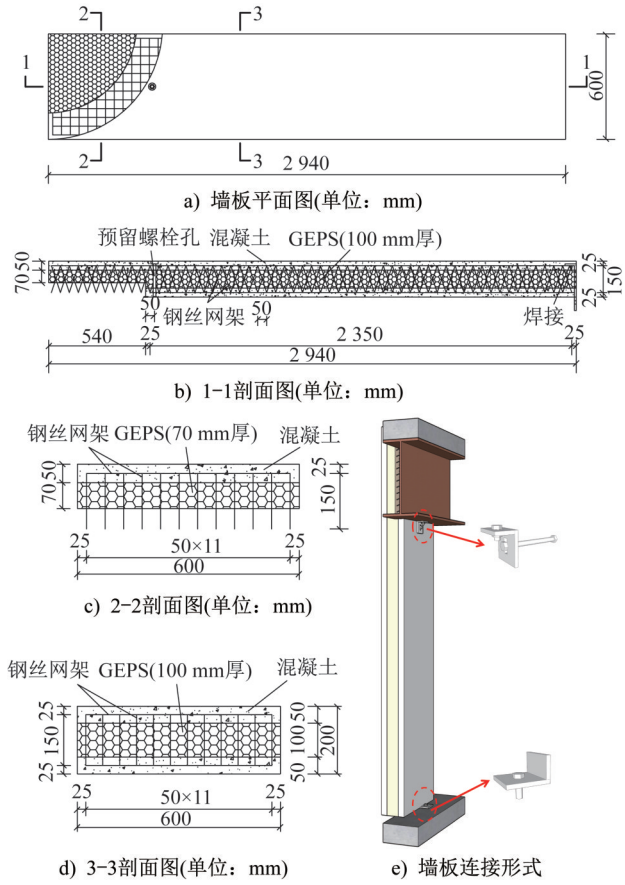


图3　模块化节能复合墙板构造及连接形式

Fig. 3　Structure and connection form of modular energy-saving composite wall

高强螺栓固定于振动台台面；墙板拼接及连接采用4.8级M16普通螺栓。施工时先吊装墙板就位，上部使用连接件与H型钢梁下翼缘连接，下部使用预埋件与楼（地）板连接，“上拉下托”的设计可以实现墙板与框架的稳定连

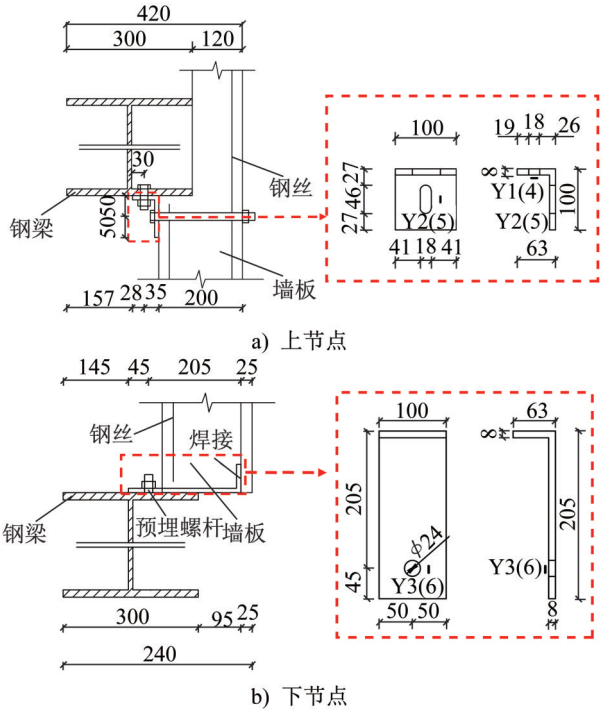


图4 连接节点详图及应变片布置(单位:mm)

Fig. 4 Details of connection joints and strain gauge arrangement (unit: mm)

接。该结构可有效阻断冷桥,保温节能效果突出,全装配式构造也能大幅提升施工效率、降低造价。拼装完成的试验试件如图5所示。



图5 试件构造

Fig. 5 Construction of specimen

1.2 材性试验

参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)[11],对墙板浇筑过程中预留的混凝土试块开展抗压强度试验研究,混凝土材性试验结果如表2所示;参照《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)[12]和《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—2018)[13],对型钢连接件、低碳镀锌钢丝进行拉伸试验,钢材材性试验结果如表3所示,钢丝材性试验果如表4所示。

表2 混凝土材性试验结果

Table 2 Concrete material property test results

混凝土等级	抗压强度/MPa	抗压强度平均值/MPa	弹性模量/($\times10^4$ MPa)	弹性模量平均值/($\times10^4$ MPa)
Lc7.5	7.3	7.3	0.84	0.89
	7.7		0.94	
	7.0		0.90	

表3 钢材材性试验结果

Table 3 Steel material property test results

试件编号	厚度t/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/($\times10^5$ MPa)	伸长率/%
J-1	8	278	391	1.96	36.3
J-2		289	406	2.07	36.9
J-3		295	415	2.10	38.0
平均值		287	404	2.04	37.1

注:J-1~J-3为钢框架型钢取样试件,编号1~3表示同类平行试样。

表4 钢丝材性试验结果

Table 4 Steel wire material property test results

试件编号	直径/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
GS-1	2.5	434.6	547.9	5.3
GS-2		436.2	548.5	7.5
GS-3		434.2	550.6	6.7
平均值		435.0	549.0	6.5

注:GS-1~GS-3为钢丝网架区域取样试件,编号1~3表示同类平行试样。

1.3 测点布置

本次试验主要测试内容:地震作用下模块化节能复合墙板的加速度响应、结构动力特性、关键部位应变与变形。加速度传感器分别布置于振动台台面、钢框架及墙板中心,共布设7个单向加速度测点;位移测点设置在钢柱与墙板的顶部、底部位置,共计8个。为监测试验全过程的结构应变响应,在1轴、A轴墙板连接节点及西南柱梁柱角钢处布置10个应变片。具体布置情况如图4、6所示,测点编号中A、D、Y分别表示加速度传感器、位移传感器和应变片。为确保采集数据的可靠性,试验前在振动台上对各传感器进行一致性标定。

1.4 加载方案

试验所用振动台台面尺寸为3 m×3 m,最大载重为10 t,台面输出加速度范围为$-1.2g$~$1.2g$。根据《建筑抗

震设计标准》(GB 50011—2010)[14],本次试验选用两条实际强震记录与一条人工地震波作为输入激励。试验场地按照石家庄地区Ⅱ类场地、第二组设计地震分组、7度抗震设防烈度、0.10g设计基本加速度取值。结合场地条件生成目标反应谱,并基于该谱在PEER地震动数据库中筛选匹配的天然地震波[15]。最终选取EL-Centro波、Taft波及兰州波开展试验,地震波沿x向进行单向加载。各地震波加速度时程曲线见图7,对应的加速度反应谱见图8。

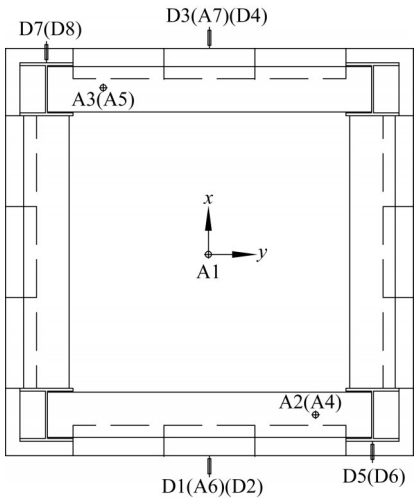


图6　加速度传感器和位移传感器布置

Fig. 6　Arrangement of acceleration and displacement sensors

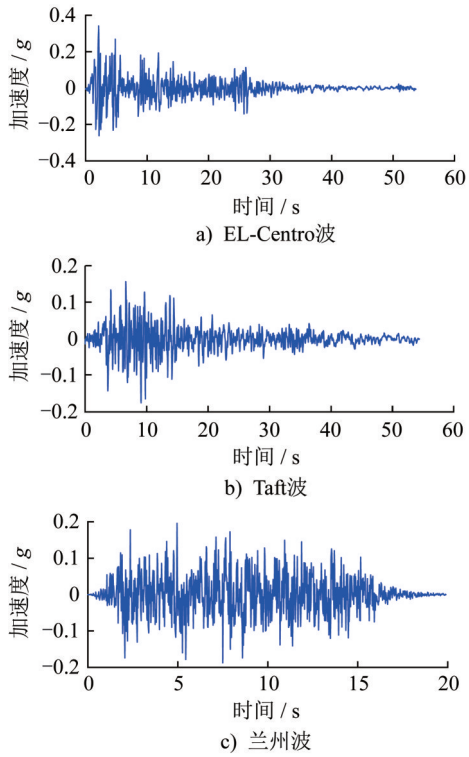


图7　各地震波加速度时程曲线

Fig. 7　Seismic wave acceleration time-history curves

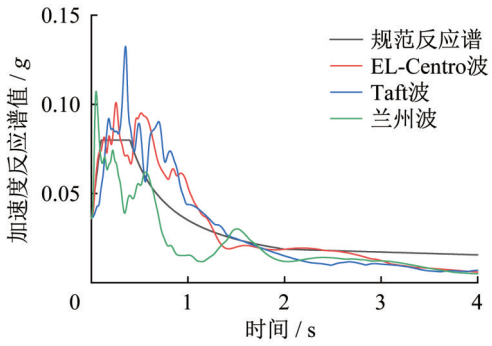


图8　各地震波加速度反应谱曲线

Fig. 8　Seismic wave acceleration response spectra curves

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)[16],振动台试验加载等级涵盖8度多遇(A=0.07g)至8度极罕遇地震(A=0.60g)。各级加载均按照EL-Centro波、Taft波、兰州波的顺序依次输入,同时按照规范要求对台面输入加速度峰值进行逐级调幅。在试验开始前以及每级加载后,采用0.05g的白噪声对结构进行激振,以观测结构的动力特征。本次试验共设置了4个加载等级、5组白噪声激振工况,共17种加载工况,加载工况设置见表5。

表5　加载工况

Table 5　Loading cases

试验工况	设防水准	地震激励	A/g
1	—	白噪声	0.05
2	8度多遇	EL-Centro波	0.07
3		Taft波	
4		兰州波	
5	—	白噪声	0.05
6	8度基本	EL-Centro波	0.20
7		Taft波	
8		兰州波	
9	—	白噪声	0.05
10	8度罕遇	EL-Centro波	0.40
11		Taft波	
12		兰州波	
13	—	白噪声	0.05
14	8度极罕遇	EL-Centro波	0.60
15		Taft波	
16		兰州波	
17	—	白噪声	0.05

2　试验现象

A=0.07g时,试件无明显晃动,层间位移较小。复

合墙板随钢框架结构整体平动，墙板与框架之间未发生碰撞；预埋件、连接节点以及角钢均未产生变形，节点与窗洞口区域也未见裂缝开展。

$A=0.20g$时，试件出现轻微晃动，复合墙板与钢框架之间开始接触并发生轻微摩擦。复合墙板保持完好，仅在上部连接节点、部分窗洞口角部等应力集中位置出现细微裂缝；预埋件、连接节点与角钢无明显变形，墙板整体刚度未受显著影响，墙板与钢框架连接可靠。

$A=0.40g$时，试件出现明显晃动，复合墙板与钢框架之间发生明显碰撞，墙板和墙板、墙板和钢框架之间均产生摩擦，碰撞声响较小。随着地震作用进一步增大，墙板表面陆续出现多条细微裂缝；裂缝分布范围扩大，除上下连接节点、窗洞口等关键区域外，墙板中部及上部外伸部位也产生裂缝，但未形成贯通长缝，墙板整体结构保持完整。连接节点发生滑移，有效耗散部分地震作用；节点处未出现弯曲、预埋件被拔出等问题，达到了设计的预期效果。

$A=0.60g$时，试件出现剧烈晃动。试验过程中地震作用持续加剧，连接节点处的垫片与角钢产生明显转动，螺栓与垫片间发生摩擦；墙板之间、墙板与钢框架之间碰撞加剧，节点出现外拔现象，外拔量约5 mm。墙板裂缝持续扩展，窗洞口角部斜裂缝、墙板变截面外挑处的裂缝均发展为贯通缝；但墙板未出现混凝土脱落、局部破坏现象，整体完整性良好。

试验过程中，裂缝的出现和发展会对墙板刚度、抗震性能产生影响。在高地震烈度作用下，裂缝扩展会造成墙板刚度小幅降低，但试验结果表明裂缝并未引发结构失效。$A=0.60g$工况下，墙板裂缝发展为贯通缝，但整体完整性良好，未出现混凝土脱落与局部破坏。总体而言，该模块化节能复合墙板、连接节点及整体结构均通过了8度极罕遇地震测试，满足“小震不坏，中震可修，大震不倒”的抗震设防要求，具备良好的抗震性能。试验过程中出现的破坏现象如图9所示。



a) 墙板连接节点裂缝　b) L连接节点松动

c) 窗洞口裂缝　d) 墙板裂缝

图9　试验破坏现象

Fig. 9　Test failure phenomena

3　试验结果与分析

3.1　动力特性

为测定钢框架外挂模块化节能复合墙板结构的动力特性，在不同烈度地震加载前后，先后输入5组白噪声信号完成扫频试验。使用东华数据采集系统对x向加速度数据进行处理，得到结构x向自振频率，试验结果见表6。

结合频率数据，可分析钢框架结构的自振频率变化规律与损伤发展情况，探究墙板对钢框架结构刚度的影响。由表6可知，该结构自振频率整体偏大；在8度罕遇地震作用之前，自振频率保持不变，说明此阶段结构处于弹性状态，刚度未发生变化。随着A不断增大，钢框架结构损伤逐步累积，自振频率出现衰减。8度罕遇地震后，钢框架结构自振频率较初始值下降了2.8%，降幅较小，这是由墙板开裂、刚度贡献下降导致；8度极罕遇地震后，自振频率较初始值下降了9.4%，表明钢框架结构产生了一定的损伤。

表6　钢框架结构自振频率

Table 6　Natural frequencies of steel frame structure

试验工况	自振频率/Hz	自振周期/s
1	8.320	0.120
5	8.320	0.120
9	8.320	0.120
13	8.086	0.124
17	7.539	0.133

3.2　加速度响应

为更好评价钢框架外挂模块化节能复合墙板结构的动力响应特征，引入加速度放大系数作为分析指标[17]。该系数定义为结构顶部加速度峰值与振动台台面输入加速度峰值的比值。不同地震波下，结构的加速度放大系数变化规律如图10所示。

由图10可知，三条地震波作用下该结构的动力响应差异显著，EL-Centro波的加速度放大系数在1.064～1.482之间，在$A=0.20g$时达到最大值1.482，随后持续下降；Taft波的加速度放大系数在1.028～1.122之间，随台面A增大加速度放大系数不断减小，在$A=0.60g$时略有回升；兰州波的加速度放大系数在1.253～2.027之间，$A=0.07g$时产生最大值2.027，且该系数在$A=0.40g$前上下波动，之后开始降低。

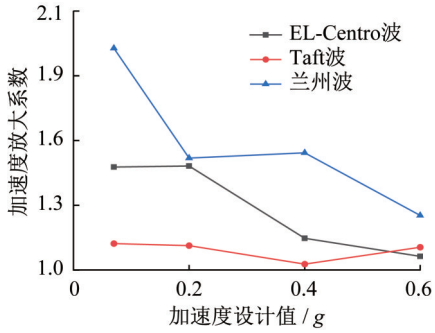


图10　结构加速度放大系数

Fig. 10　Acceleration amplification factor of structure

随着振动台台面A持续增加，加速度放大系数整体呈下降趋势，说明结构损伤程度加重、刚度降低，与试验现象相吻合。A增大后，墙板与钢框架由单纯平动转为复杂的碰撞、摩擦作用；墙板开裂、连接节点转动与滑移会增大构件相对位移，摩擦和碰撞产生能量耗散，减弱加速度传递效果，进而导致放大系数减小。相比另外两种地震波，兰州波对应的加速度放大系数最大，体现了地震波频谱与结构动力特性对加速度响应的影响。该结构加速度放大系数处于1.028～2.027范围内，明显低于混凝土等刚性结构的2.000～4.000，水平地震响应小于传统刚性结构的水平地震响应。

3.3　位移响应

层间位移角是评价结构变形能力和位移响应的重要指标。通过在试验现场搭建脚手架，在钢框架、墙板顶部与底部各布置4个拉线式位移传感器。对采集的各位移时程数据进行差值运算，得到结构层间位移时程。选取8度罕遇工况的Taft波作为分析对象，图11为x向地震波作用下墙板及钢框架顶部与底部的位移时程曲线，不同地震水准对应的结构最大层间位移见图12。

由图可知，结构位移响应基本与输入地震波波形保持一致。随着振动台台面A不断升高，结构最大层间位移稳步增大，结构未发生刚度突变。同一地震工况下，钢框架与墙板的层间位移相差较小，试验过程中二者始终保持稳定连接。8度极罕遇地震作用时，钢框架与墙板的最大层间位移角分别为1/340和1/307，符合《建筑抗震设计标准》(GB 50011—2010)[14]规定的钢结构弹性层间位移角限值(1/250)。

3.4　连接节点验算

模块化节能复合墙板采用螺栓连接方式固定于钢框架。水平地震作用下，墙板上下连接节点承受板面内、面外惯性力。各级地震作用下连接节点的应变变化如图13所示。由图可知：(1) 节点应变随地震等级提高逐渐增大，A轴节点应变大于1轴节点应变，这是由于1轴墙板

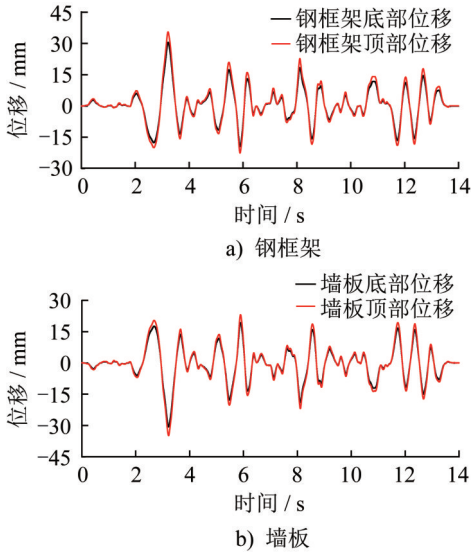


图11　8度罕遇Taft波作用下结构的位移时程曲线

Fig. 11　Displacement time-history curves of structure under 8-degree rare Taft wave

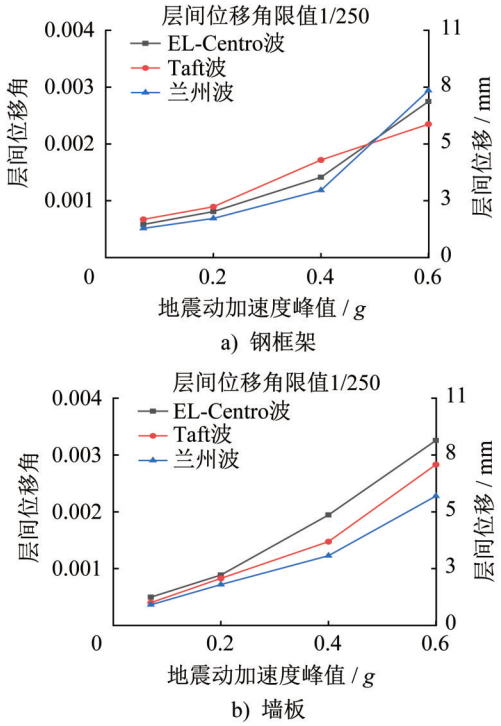


图12　结构层间位移角

Fig. 12　Inter-story drift ratio of structure

平行于地震作用方向布置，刚度相对更大；(2) 上节点应变大于下节点应变，试验全过程中连接节点均未进入屈服状态，始终保持弹性；(3) 节点最大应力为257 MPa，对应测点为A轴Y6。原因为墙板在地震作用下沿下部节点大圆孔滑移，致使节点受力位置发生改变。

对螺杆的抗拉(压)和抗剪承载力进行验算。以标准墙板为例，单块墙板质量为220 kg。墙板所受惯性力如表7所示。

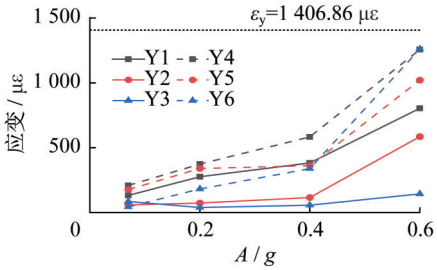


图13 连接节点应变

Fig. 13 Strain of connections

表7 墙板惯性力

Table 7 Inertia force of wall panel

试验工况	地震波	作用部位	加速度/g	惯性力/kN
15	Taft波	面内	0.699	1.538
16	兰州波	面外	0.780	1.716

连接节点均使用直径为16 mm的普通螺杆，按照至少一个节点正常工作的前提，依据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)[18]进行验算：1.538＜56.297$\left(56.297=2\times\frac{\pi\times16^2}{4}\times0.14\right)$。

连接节点满足抗剪承载力要求；1.716＜26.620$\left(26.620=\frac{\pi\times14.12^2}{4}\times0.17\right)$，连接节点满足抗拉(压)承载力要求。

此外，应变测试结果表明，在8度极罕遇地震作用下，钢框架部分梁柱节点角钢达到极限拉应变并发生屈服。因节点设置有加劲肋，结构仅产生微小塑性变形，整体刚度小幅下降。而在此之前，钢框架始终处于弹性工作阶段，该变化规律与结构动力特性、加速度响应分析结果一致。

4 结论

通过外挂模块化节能复合墙板钢框架足尺地震模拟振动台试验，研究了钢框架、墙板及连接件的抗震性能。总体来看，墙板、连接件与整体模型在8度极罕遇地震试验中均未发生明显破坏，满足抗震设防相关要求，抗震性能优良。具体结论如下：

(1) 外挂模块化节能复合墙板钢框架在8度多遇(A=0.07g)～8度极罕遇(A=0.60g)地震作用下表现良好，未出现明显破坏，满足“小震不坏，中震可修，大震不倒”的建筑抗震要求，结构拥有充足安全储备。

(2) 结构在8度多遇、基本、罕遇地震作用下均处于弹性状态；8度极罕遇地震作用时，墙板裂缝开展、连接节点松动，造成结构自振频率小幅降低。

(3) 结构整体刚度偏大。台面A升高后，不同地震波对应的加速度放大系数整体下降，数值介于1.028～2.027之间，说明墙板连接节点可有效耗散地震能量。

(4) 试验中钢框架与墙板层间相对位移差异较小，二者始终连接可靠；所有工况的层间位移角均满足《建筑抗震设计标准》(GB 50011—2010)[14]中钢结构弹性与弹塑性层间位移角限值要求。

(5) 墙板连接节点抗拉、抗压、抗剪承载力均满足要求，试验期间工作稳定；墙板整体完整性良好，无混凝土碎块脱落问题。

参考文献：

[1] 王俊，赵基达，胡宗羽. 我国建筑工业化发展现状与思考[J]. 土木工程学报，2016，49(5)：1-8. DOI：10.15951/j.tmgcxb.2016.05.001.
WANG Jun, ZHAO Jida, HU Zongyu. Review and thinking on development of building industrialization in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 1-8. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2016.05.001.(in Chinese)

[2] 周绪红，王宇航. 我国钢结构住宅产业化发展的现状、问题与对策[J]. 土木工程学报，2019，52(1)：1-7. DOI：10.15951/j.tmgcxb.2019.01.001.
ZHOU Xuhong, WANG Yuhang. Status, problems and countermeasures of industrialization development of steel structural residence in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(1): 1-7. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2019.01.001.(in Chinese)

[3] 吴香国，陶晓坤，于士彦，等. 高性能复合夹芯外挂墙板应用研究进展[J]. 建筑结构，2020，50(增刊1)：611-616. DOI：10.19701/j.jzjg.2020.s1.117.
WU Xiangguo, TAO Xiaokun, YU Shiyan, et al. Research progress of high-performance composite sandwich panel [J]. Building Structure, 2020, 50(Suppl. 1): 611-616. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.s1.117.(in Chinese)

[4] 李国强，王城. 外挂式和内嵌式ALC墙板钢框架结构的滞回性能试验研究[J]. 钢结构，2005，20(1)：52-56. DOI：10.3969/j.issn.1007-9963.2005.01.015.
LI Guoqiang, WANG Cheng. The hysterestic behavior of steel frames with ALC out-hung and in-filled walls [J]. Steel Construction, 2005, 20(1): 52-56. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9963.2005.01.015.(in Chinese)

[5] 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)：27-31，38. DOI：10.15951/j.tmgcxb.2005.10.005.
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): 27-31, 38. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2005.10.005.(in Chinese)

(下转第81页)