

一种用于农村住房的轻型框架结构抗震性能 足尺试验

倪泽阳¹, 生安香², 王成波¹, 李建赢³, 李立云²

(1. 北新建材集团有限公司, 北京 100048; 2. 北京工业大学城市建设学部, 北京 100124;
3. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013)

摘要: 为升级农村住房水平以满足人们日益增长的对舒适、安全、环保、节能的需求, 提出并设计了一种轻型框架结构体系住宅, 该结构体系以钢框架作为结构主体, 外挂 ALC 墙板作为填充墙体。通过振动台试验检验其抗震性能, 获得该轻型框架结构在地震作用下梁柱节点和房屋整体的抗震性能和地震响应规律。设计足尺结构模型, 输入 El Centro、Taft、北京人工波进行振动台试验, 通过布设传感器测量结构的地震响应。试验过程中, 墙板未脱落, 节点连接完好, 结构未倒塌; 随着输入地震作用强度的增大, 结构的加速度放大系数、相对位移随之增大, 但结构自振频率逐渐降低; 试验过程中主体结构构件保持弹性, 6 度设防地震作用下结构层间位移角均小于 1/250; 7 度罕遇、8 度罕遇地震作用下, 结构的层间位移角超过 1/250, 但通过拉紧拉杆支撑可减小结构变形。试验结果表明, 该轻型框架结构体系具有较好的抗震性能, 可达到 6 度抗震设防水准, 对于 6 度以上抗震设防区可通过增大拉杆拉力等措施增强其抗震性能。

关键词: 轻钢框架; ALC 墙板; 足尺模型; 振动台试验

中图分类号: TU393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2025)05-1120-13

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2025.05.023

Full-scale test for seismic performance of a lightweight frame structure for rural houses

NI Zeyang¹, SHENG Anxiang², WANG Chengbo¹, LI Jianying³, LI Liyun²

(1. Beijing New Building Materials Group (BNBMG), Beijing 100048, China;
2. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
3. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

Abstract: To upgrade the level of rural housing to meet the increasing demand for comfort, safety, environmental protection and energy saving, a light frame structure system housing was proposed and designed. The light frame structure system takes a steel frame as the main structural body and ALC wall panel as the filling wall. A full-scale shaking table test has been carried out to verify its seismic performance and to study the seismic behavior and seismic response law of the light frame structure system under earthquake action on beam-column joints, wall-slab joints, and the building structure. The test results show that the wall panel has not fallen off, the joint connection is intact, and the structure has not collapsed. With the increase of input seismic intensity, both the acceleration amplification factor and relative displacement increase, while the natural frequency of the structure decreases gradually. Throughout the test, the main structural members remain elastic, and the inter-story displacement angle of the structure under a fortification earthquake of 6-degree is less than 1/250. Under the action of rare earthquakes of 7th intensity and 8th intensity, the inter-story displacement angle of the structure exceeds 1/250, but the structural deformation can be reduced by tensioning reinforcement support. The light frame structure system exhibited excellent seismic performance and can be used to improve the level of rural housing in the 6th intensity seismic fortification area. For seismic fortification areas above 6th intensity, the seismic performance can be enhanced by increasing the tension of tie bars.

Keywords: light steel frame; ALC wall panel; full-scale model; shaking table test

随着中国新农村建设的迅速发展, 农村住房正在不断升级改善, 新型农村住房以安全可靠、经济适用、耐久性好等为建设目标。钢结构建筑体系具

有可装配、施工速度快、质量易保证的优点, 而蒸压轻质加气混凝土(简称 ALC)板具有轻质高强、保温、隔热、隔声性能良好的特点, 界面黏结强度和抗

压强度都很高,且造价低、施工方便、可加工性强、环保利废、生产规模大、生产设备成熟,满足现行住宅节能设计标准提出的节能50%的要求^[1-2]。徐怡婷^[3]试验证实了装配式轻质ALC复合条板的破坏荷载可达到《建筑隔墙用轻质条板通用技术要求》JG/T 169—2016^[4]的要求。因此,以ALC做围护结构的钢结构建筑体系可以满足人们对舒适、安全、节能、环保等多功能的需求。同时,该类结构体系使用标准化的梁、柱构件和标准节点,外围围护系统同样采用工厂化的产品,可实现规模化量产,亦可有效缓解钢铁产能过剩,具有无可比拟的成本优势。为此,针对新型农村建设住房需求,本文研发设计了一种以钢框架为结构主体、外挂ALC墙板作为填充墙体的适用于农村住房的轻型钢框架结构体系(简称轻框结构体系)。与现有装配式轻型钢结构房屋相比,本文研究的轻型钢框架结构体系具有以下优势:(1)结构与墙体均采用全螺栓装配连接,现场无焊接,施工速度快,大幅提高加工精度和安装效率,并保证了连接的可靠性。(2)采用轻型外围护、轻型内墙与轻型楼板,减小恒载并保证无空洞和震颤感,减小了房屋自重且节约了房屋结构的造价。(3)采用较小的梁柱尺寸及特殊的构造,保证结构藏于墙内,室内藏梁藏柱、空间整齐、便于布置家具、不浪费空间。(4)结构柱间、门窗框和柱间设置X形拉杆,增强结构刚度,且在地震作用下,拉杆首先耗能屈服,保证主体结构安全、稳定。拉杆破坏后可替换,实现轻框结构可持续使用。(5)基础与墙板、墙板与墙板间采用弹性条连接构造,起到防水密封效果的同时,减小侧向力对墙板的破坏。

中国是一个地震多发的国家,建筑结构的抗震问题一直被社会各界所关心。已有针对钢结构抗震问题的研究多聚焦于节点的抗震性能^[5-10],以钢结构整体抗震性能为对象时或采用数值方法^[11]、或利用拟静力试验和振动台试验开展几何缩尺试验研究^[12-14]。在ALC墙板与钢框架协同受力和抗震性能方面,刘玉姝等^[15]、赵滇生等^[16]、KARADUMAN等^[17]、TEEUWEN等^[18]研究发现内嵌ALC板墙体在破坏前对钢框架可提供较大的刚度和承载力;戴绍斌等^[19]研究发现,加气混凝土填充墙与钢框架协同工作可以改善钢框架结构的受力和抗震性能;胡精武等^[20]试验发现,内嵌ALC墙板钢框架结构的层间侧向刚度较纯钢框架提高了111%;王雪芹等^[21]认为外挂ALC墙板对结构的承载力、延性和刚度影响很小,但王波等^[22-23]对带ALC墙板的钢管混凝土框架结构进行低周反复荷载试验后认为,采用U形钢卡、钩头螺栓和拉结筋等构造措施的ALC条板与钢管混凝土框架可协同抗震、共同受力,内嵌或外挂ALC墙板的

框架结构均表现出良好的抗震性能和变形能力。田海等^[24]试验发现拼合界面的黏结性能、墙板和灌浆的材性影响墙板自身的剪切性能。李国强等^[25]建议墙板外挂时钢结构住宅层间允许变形取值为1/200,墙板内嵌时,层间允许变形取值为1/300。

上述研究表明,内嵌式墙板抗震性能优于外挂墙板,但外挂ALC墙板可以节省出很多空间,且填充墙板与钢框架的连接方式、连接所采用的材料性能等对其抗震能力有很大的影响,通过改进节点连接方式可以使外挂ALC墙板与钢框架共同工作。本文聚焦外挂ALC墙板钢框架结构的整体抗震性能,设计并开展了一个轻型钢框架结构足尺模型振动台试验,揭示地震作用下梁柱节点和房屋结构整体的地震响应规律,探讨该轻框结构在抗震设防地区新农村建设中的适用性。

1 振动台试验概况

1.1 新型轻框结构体系

振动台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完成。考虑农村住房需求以及振动台台面尺寸和承载能力,试验对象为一外挂ALC墙板钢框架结构足尺模型,结构钢材依据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[26]选取,ALC墙板根据《蒸压加气混凝土板》(GB/T 15762—2020)^[27]加工。轻框结构的柱截面尺寸设计较小,梁柱连接均为半刚性连接节点,柱构件仅考虑竖向荷载及少量水平地震荷载作用,大部分水平荷载由支撑及窗框承担。采用容重不超过650 kN/m³的轻质混凝土材料作为外围护及楼板。如图1所示,试验模型为两层两跨框架结构,结构平面尺寸为6 m×4.2 m,结构底层层高3.2 m,第二层层高2.8 m,屋架高度为0.822 m。框架柱(GZ1)采用方钢管柱,钢管截面尺寸为100 mm×100 mm×4 mm;框架梁(GL1)采用HN200 mm×100 mm×5.5 mm×8 mm轧制钢梁,次梁(GL2)采用HN150 mm×75 mm×5 mm×7 mm轧制钢梁;屋架呈三角形,屋架、檩条及门框(MK1、MK2)、窗框(CK1、CK2)材料均采用矩形钢管,钢管截面尺寸为50 mm×100 mm×3 mm。如图2所示,梁柱连接采用半刚性连接(梁端焊端板,钢柱侧壁开螺栓孔自带丝扣,采用高强螺栓连接),主梁和次梁之间采用铰接方式,通过M12高强螺栓连接;柱脚与钢筋混凝土基座通过锚固在基础内的螺栓连接;为保证结构的稳定,在各层顶板位置、框架柱之间以及门窗框架之间架设φ14拉杆支撑(ZC1),支撑拉力通过旋紧M16花篮螺栓施加。

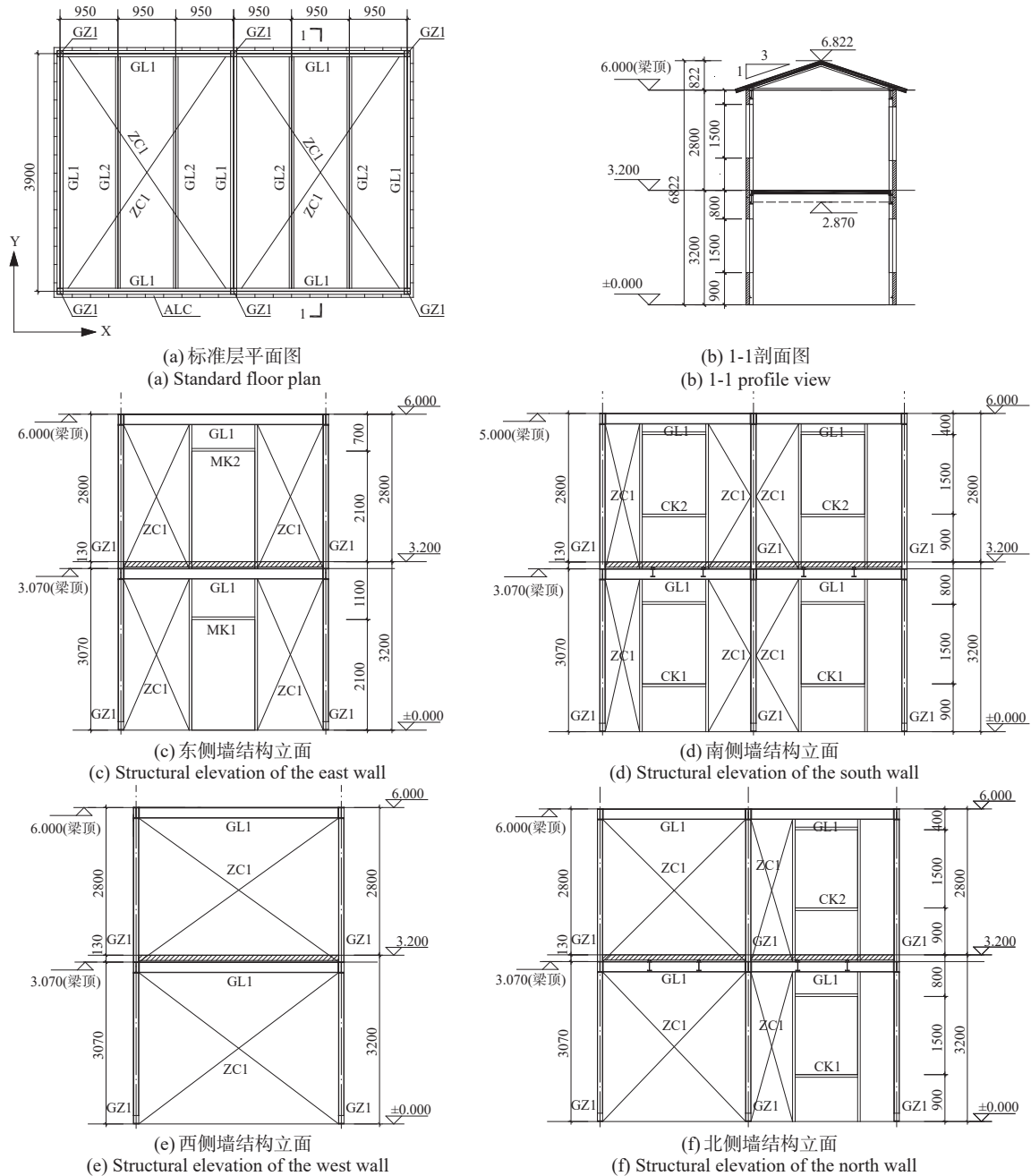


图 1 结构模型 (单位: mm)

Fig. 1 Structural models (Unit: mm)

外挂 ALC 墙板厚 100 mm, 一侧边呈凹槽、另一侧呈凸起(如图 3(a)所示), 在墙板接缝处填充水泥砂浆。墙板底部采用钢板和螺栓固定(如图 3(b)所示)。楼板亦采用预制 ALC 板, 板厚 100 mm。结构节点连接详图如图 3(c)所示, 整体模型如图 3(d)所示。考虑试验过程的安全性, 屋盖通过绑扎普通彩钢板铺设, 利用施加负重块模拟真实条件下的屋顶自重(如图 3(e)所示)。表 1 列出了该轻框结构构件材料的力学参数, 由生产厂家提供。

1.2 试验方案

根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[28], 考虑本文轻框结构的自振频率和适用场地类别, 选

取 El Centro 地震记录(1940 年取自 Imperial 山谷)和 Taft 地震记录(1952 年取自 Lincoln School)作为天然地震进行输入; 同时, 合成了一条北京人工地震时程用于本试验地震输入。通过调整各条地震记录的加速度幅值, 测试该轻框结构在 6 度设防地震、6 度罕遇地震、7 度罕遇地震、8 度罕遇地震等工况下的动力响应。图 4 为试验输入地震动的加速度时程曲线及对应的功率密度。

试验布置了 10 个加速度传感器监测地震作用下结构的加速度响应和层间位移, 其中, 钢框架与基础相交位置放置 2 个, 第一层柱顶放置 4 个, 第二层柱顶放置 4 个。设置 14 个电阻应变片测量梁柱的应变响应, 应变片布置在一层边柱和中柱的柱顶、柱脚

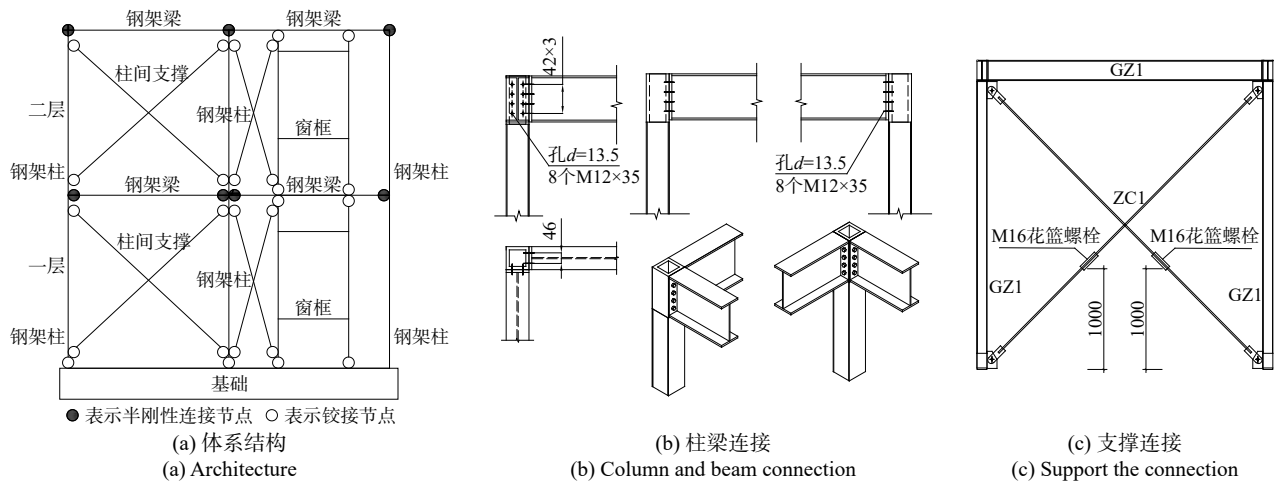
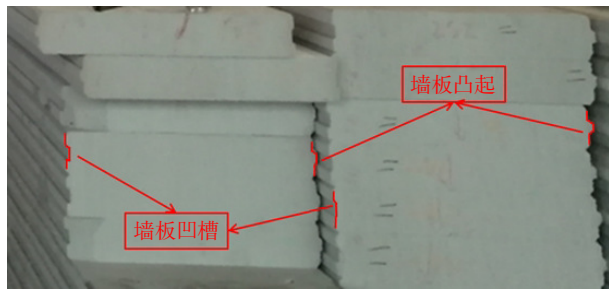
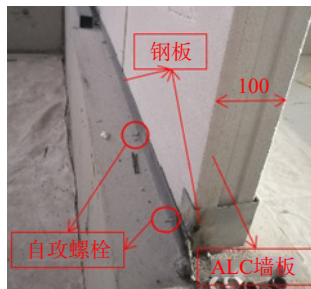


图 2 构件连接 (单位: mm)

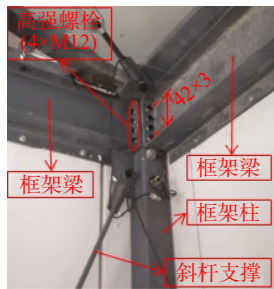
Fig. 2 Connection of components (Unit: mm)



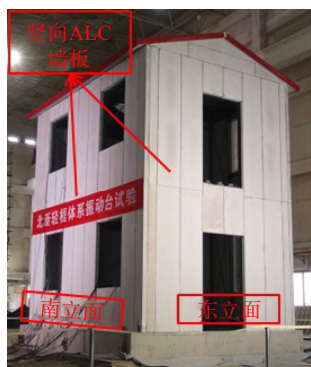
(a) ALC 墙板
(a) ALC wall panel



(b) 墙板连接 (单位: mm)
(b) Wall panel connection (Unit: mm)



(c) 节点详图 (单位: mm)
(c) Node details (Unit: mm)



(d) 整体模型
(d) Overall model



(e) 屋顶负重块
(e) Roof weight block

图 3 振动台试验模型

Fig. 3 Shaking table test model

处及一层梁的下表面。测点布设如图 5 所示, 其中, s1、s3、s5、s7、s9、s11、s13、s14 按 X 水平方向(东西方向)布设, s2、s4、s6、s8、s10、s12 按 Y 水平方向

表 1 结构构件材料参数

Tab. 1 Material parameters of structural components

构件	材质	截面/mm	f_y / MPa	f_t / f_c /MPa
框架柱	Q235B 钢	100×100×4	235	215/215
框架梁	Q235B 钢	HN200×100×5.5×8	235	215/215
次梁	Q235B 钢	HN150×75×5×7	235	215/215
屋架	Q235B 钢	50×100×3	235	215/215
檩条	Q235B 钢	50×100×3	235	215/215
门框	Q235B 钢	50×100×3	235	215/215
窗框	Q235B 钢	50×100×3	235	215/215
拉杆支撑	Q235B 钢	φ14	235	215/215
高强螺栓	10.9 级钢	M12	—	430/430
花篮螺栓	钢	M16	—	430/430
外墙	ALC	1800×600×100	—	—/3.5
屋盖	ALC	1800×600×100	—	—/3.5
楼板	ALC	1800×600×100	—	—/3.5

注: f_y 为屈服强度; f_t 、 f_c 分别为抗拉强度和抗压强度。

(南北方向)布设。

依据《建筑幕墙抗震性能振动台试验方法》(GB/T 18575—2017)^[29], 试验加载按 6 度设防地震、6 度罕遇地震、7 度罕遇地震、和 8 度罕遇地震的顺序分 3 个阶段进行, 第一阶段包含 6 度设防地震作用和 6 度罕遇地震作用工况, 依次输入 El Centro 地震记录、Taft 地震记录和北京人工地震记录, 激振方向依次为 X 水平方向、Y 水平方向和 XY 水平双方向, 该阶段试验中完全放开柱间拉杆支撑, 只考察梁柱体系的抗震性能; 第二阶段和第三阶段分别为 7 度罕遇地震作用和 8 度罕遇地震作用工况, 水平双向输入 Taft 地震记录, 考虑到前一阶段试验对梁柱构件可能已造成损伤, 试验开始前拉紧柱间拉筋斜撑, 增强结构的整体刚度, 若拉筋已断则予以替换。

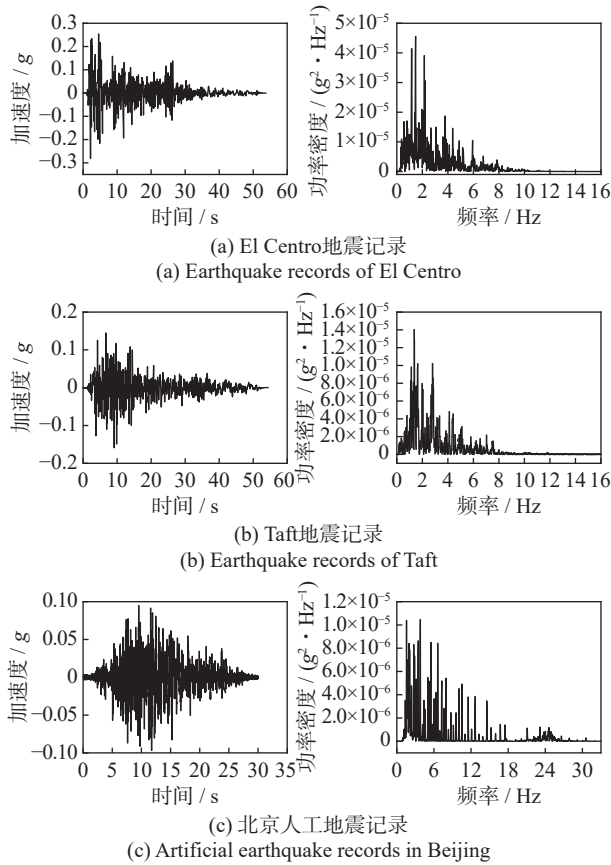


图 4 地震加速度时程曲线及对应的功率密度

Fig. 4 Time-history curve of seismic acceleration and corresponding power density

在不同水准地震动输入前后均利用白噪声扫频测量结构体系的自振频率。试验加载工况列于表 2。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象

当输入地震加速度峰值为 0.05g(即 6 度设防地震)时,各种工况下结构均没有裂缝出现;在 6 度罕遇地震作用下,单向依次输入 El Centro 地震记录、Taft 地震记录、人工地震记录,结构均没有裂缝出现;当输入 XY 双向 Taft 地震记录后,北面底层墙板外侧出现一条细小的弧形裂缝(图 6(a)),宽约 0.2 mm,长约 360 mm,从墙板接缝延伸出来,与墙板侧边、底边形成三角形;东面洞口之间偏南方向连接缝之间出现一条细裂缝(图 6(b)),宽约 0.2 mm,长约 580 mm,从墙板连接节点延伸出来,呈弧形;在拐角处也出现一条细裂缝(图 6(c)),宽约 0.2 mm,长约 480 mm,沿着墙板拐角接缝延伸至墙底洞口处。墙板无严重破坏,节点连接完好。

在进行 7 度罕遇地震和 8 度罕遇地震试验之前,通过拧紧连接柱间拉筋斜撑的花篮螺栓增加了结构的稳定性和刚度。在 XY 双向输入 Taft 地震模拟 7 度罕遇地震过程中,模型结构晃动明显,结构底部

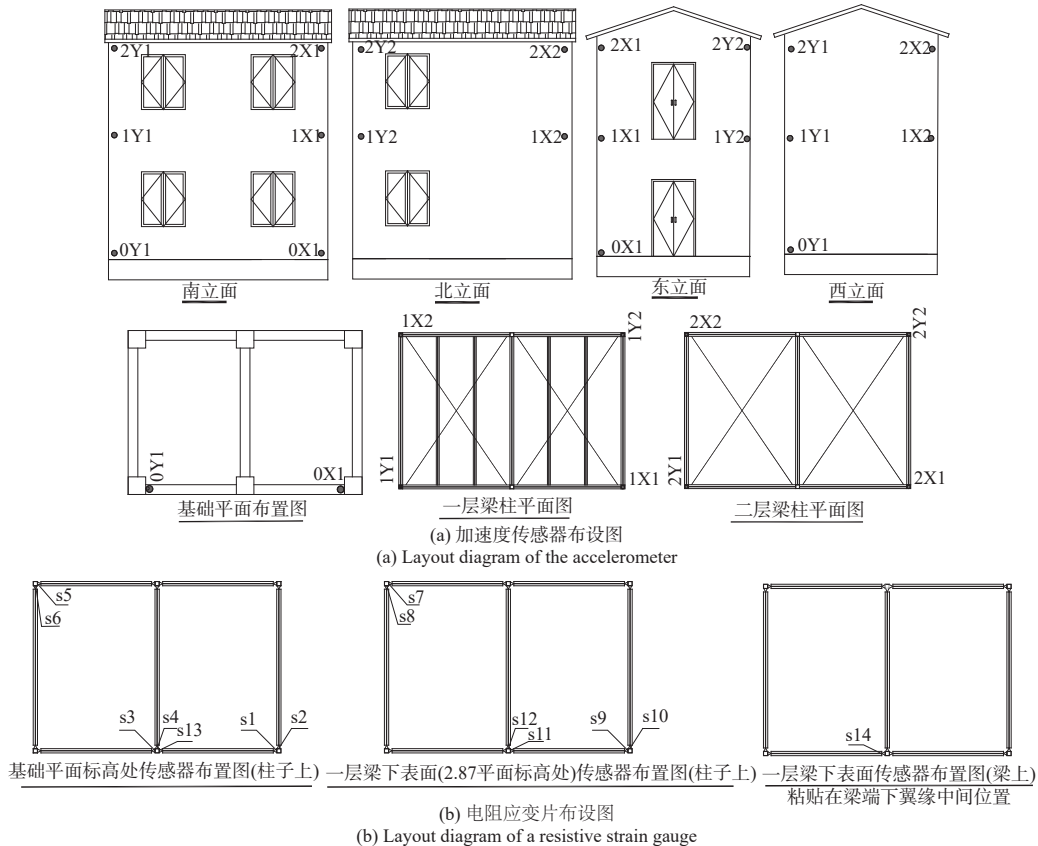


图 5 试验测点布置

Fig. 5 Arrangement of measuring points

表2 试验加载工况
Tab. 2 Test loading conditions

序号	工况编号	水准烈度	地震激励	主振方向	加速度峰值/g		备注
					X	Y	
1	WN1	白噪声			0.05	0.05	双向
2	B6EX	6度设防	El Centro	X	0.05		
3	B6TX		Taft	X	0.05		
4	B6RX		人工	X	0.05		
5	B6EY		El Centro	Y		0.05	
6	B6TY		Taft	Y		0.05	
7	B6RY		人工	Y		0.05	
8	B6TXY		Taft	XY	0.05	0.0425	
9	WN2		白噪声			0.05	0.05
10	R6EX	6度罕遇	El Centro	X	0.12		
11	R6TX		Taft	X	0.12		
12	R6RX		人工	X	0.12		
13	R6EY		El Centro	Y		0.12	
14	R6TY		Taft	Y		0.12	
15	R6RY		人工	Y		0.12	
16	R6TXY		Taft	XY	0.12	0.102	
17	WN3		白噪声			0.05	0.05
拧紧柱间拉杆支撑,提高结构整体刚度							
18	WN4	白噪声			0.05	0.05	双向
19	R7TXY	7度罕遇	Taft	XY	0.22	0.187	
20	WN5	白噪声			0.05	0.05	双向
拧紧柱间拉杆支撑,提高结构整体刚度							
21	WN6	白噪声			0.05	0.05	双向
22	R8TXY	8度罕遇	Taft	XY	0.40	0.34	
23	WN7	白噪声			0.05	0.05	双向

出现两条裂缝(图6(d)、(e)),两裂缝宽约0.5 mm,裂缝1长约130 mm,裂缝2长约280 mm,都从墙板接缝延伸至墙内连接螺栓处,与墙板侧边、底边形成三角形;南面一层中间处的柱间拉杆被拉断(图6(f)),墙板没有过大的损害,节点连接完好。

8度罕遇地震作用下,结构底面出现连续长裂缝(图6(g)),宽约1 mm,长约520 mm,沿着墙底边呈弧形延伸至拐角;且出现了小块墙体剥离现象(图6(h)),原有裂缝加宽(图6(i)),宽约2 mm,新裂缝围绕着连接螺栓;在二层发现垂直于窗框的竖向裂缝(图6(j)),宽约0.2 mm,从窗框延伸至外侧;柱间拉杆多数被拉断(图6(k))。柱间拉杆破坏耗散掉大部分能量,尽管结构晃动剧烈,但整体结构没有出现螺栓脱落现象,ALC墙板没有倒塌、脱落,主体结构构件亦未显现塑性铰,表明该轻框结构体系能够满足8度罕遇地震设防水准要求。

2.2 结构动力特性

在不同水准地震作用试验前后对试验模型进行了白噪声扫频,以了解地震作用对结构力学性能的影响。通过对模型结构各测点的加速度记录和频谱

特性进行分析,得到不同强度地震作用前后模型结构X向和Y向的自振频率和阻尼比。表3列出了不同试验阶段模型结构的自振频率和阻尼比,图7给出了结构自振频率和阻尼比的变化曲线。

由表3和图7可知,由于结构在两个方向的尺寸存在明显差异,结构体系的一阶自振频率为3.14 Hz(Y向水平),对应的自振周期为0.318 s,阻尼比为3.6%;地震作用导致结构刚度出现退化,6度设防水准地震作用后,结构自振频率未出现明显降低,阻尼比表现为略有升高,试验中结构处于弹性变形阶段;6度罕遇地震作用后,结构的自振频率出现了明显退化,降低幅度分别约为初始自振频率的23.24%(X向水平)和16.88%(Y向水平),阻尼比分别增加了14.2%(X向水平)和0(Y向水平),表明结构刚度出现退化,可能已局部进入了塑性阶段。但检查发现结构主体仍保持完好,只是连接螺栓有所松动。此后,通过拧紧螺栓和对柱间拉杆施加拉力以提高结构整体刚度。由图7可以看出,第4次白噪声扫频测得的结构自振频率得到了大幅提升,达到了4.0 Hz左右,分别为初始自振频率的121.71%(X向水平)和127.71%(Y向水平)。经过7度罕遇双向地震

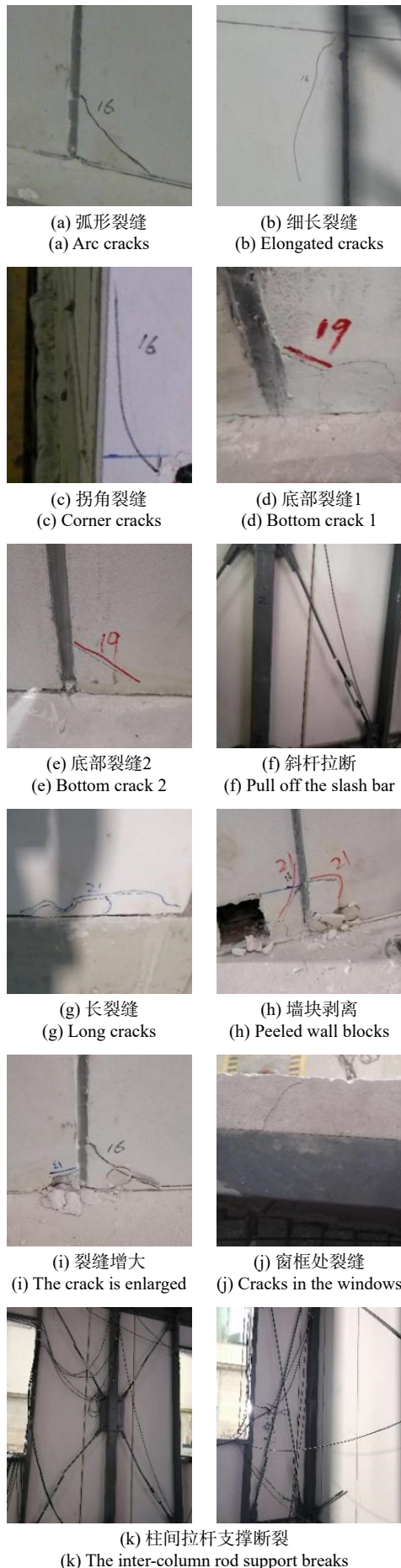


图 6 模型破坏情况

Fig. 6 Damage of model

作用后, 结构自振频率出现了更为明显的降低, 降低幅度分别为加固后的 30.9%(X 向水平)和 18.7%(Y 向水平); 但阻尼比变化不大, 表现为 X 方向增大 3.8%, 而 Y 方向不变, 表明 7 度罕遇双向地震对本模型结构的损伤不大。通过再次拧紧螺栓和对柱间拉杆施加拉力, 结构的自振频率再次得到大幅提升。之后, 经过 8 度罕遇地震作用后, 结构的自振频率再次出现大幅下降, 下降幅度分别达到第二次加固后频率值的 59.59% (X 向水平)和 54.18% (Y 向水平); 阻尼比则大幅增加, 增加量分别为 20% (X 向水平)和 26.67% (Y 向水平)。试验结束后测得的结构自振频率只有结构初始自振频率的 51.68% (X 向水平)和 42.36% (Y 向水平), 表明结构主体刚度出现大幅降低, 但宏观表现上除了柱间拉杆大量断开外, 并未发现塑性铰出现, 说明结构主体刚度退化的主要原因在于螺栓松动和柱间拉杆断开, 结构构件本身并未受到明显损伤。

2.3 时程分析

试验测得各工况下加速度响应和应变响应, 图 8 给出了 2Y1 测点以及测点 s12 在工况序号 8、16、19、22 下的加速度时程曲线和应变时程曲线。图 9 绘出了图 8(a) 对应的功率密度分布曲线。

由图 8 可以看出, 随着地震强度的增加, 加速度、应变均逐渐增大; R8TXY 工况下加速度时程曲线和应变时程曲线较其他工况出现了较大变化, 除了幅值远大于其他工况外, 10 s 之后的加速度响应和应变响应基本呈正负对称, 其原因为柱间拉杆被大量拉断, 结构刚度急剧减小, 结构反应剧烈; 在 B6TXY、R6TXY、R7TXY 工况下, 一层中柱柱顶 Y 向以受拉应变为主; 在 B6TXY 和 R6TXY 工况下残余应变很小, 基本处于弹性阶段; 在 R7TXY 工况下 s12 点的残余应变可达到 $2.5 \times 10^{-5} \mu\epsilon$; R8TXY 工况下 s12 点的残余应变更大, 约为 $9.0 \times 10^{-5} \mu\epsilon$; 表明在 7 度罕遇地震和 8 度罕遇地震作用下结构出现了较大损伤, 且损伤程度随地震强度的增加而增大。

由图 9 可以看出, 随着地震强度的增加, 功率密度曲线的幅值越来越大, 其频谱成分逐渐集中, 高能量频率成分出现了转移。6 度设防地震和 6 度罕遇地震作用下能量较大的前三阶频率成分依次为 1.163、0.598 和 0.889 Hz, 7 度罕遇地震作用下则变为 1.163、0.889 和 1.0 Hz, 8 度罕遇地震作用下为 1.34、1.39 和 1.163 Hz。

2.4 加速度放大系数

图 10 给出了各工况下模型结构各层加速度放大系数(B6EX 工况数据出现异常, 数据分析时予以剔除)。由图 10 可知, 模型结构在 X 向、双向地震激励

表 3 模型结构自振频率与阻尼比

Tab. 3 Natural frequency and damping ratio of model structure

工况	X向水平			Y向水平		
	自振频率/Hz	自振频率降幅/%	阻尼比/%	自振频率/Hz	自振频率降幅/%	阻尼比/%
试验前	3.27	0	2.1	3.14	0	3.6
6度设防地震作用后	3.05	6.73	2.1	3.02	3.82	3.8
6度罕遇地震作用后	2.51	17.70(23.24)	2.4	2.61	13.58(16.88)	3.8
第一次拉紧拉杆后	3.98	-58.57(-21.71)	2.6	4.01	-54.02(-27.71)	3.6
7度罕遇地震作用后	2.75	30.90(15.90)	2.7	3.26	18.70(-3.82)	3.6
第二次拉紧拉杆后	3.91	-42.18(-19.57)	3.0	3.95	-21.17(-25.80)	3.0
8度罕遇地震作用后	1.58	59.59(51.68)	3.6	1.81	54.18(42.36)	3.8

注: 括号内数值为相比试验前结构初始频率的结果, 负值表示自振频率增大, 正值表示自振频率降低。

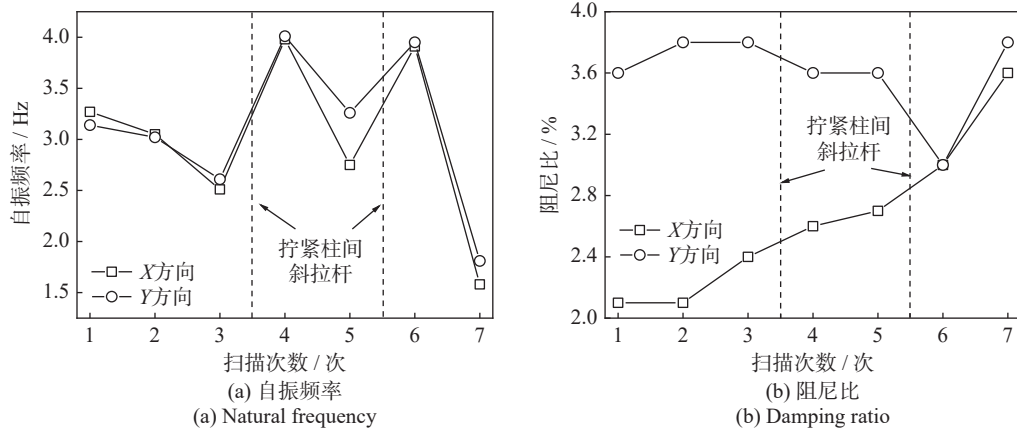


图 7 结构动力参数

Fig. 7 Dynamic parameters of structure

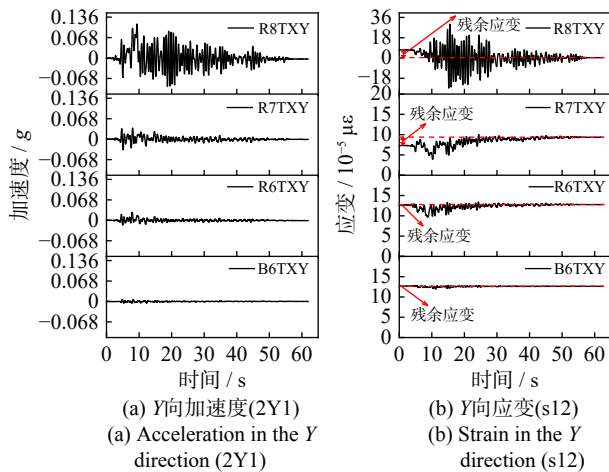


图 8 时程曲线

Fig. 8 Time-history curves

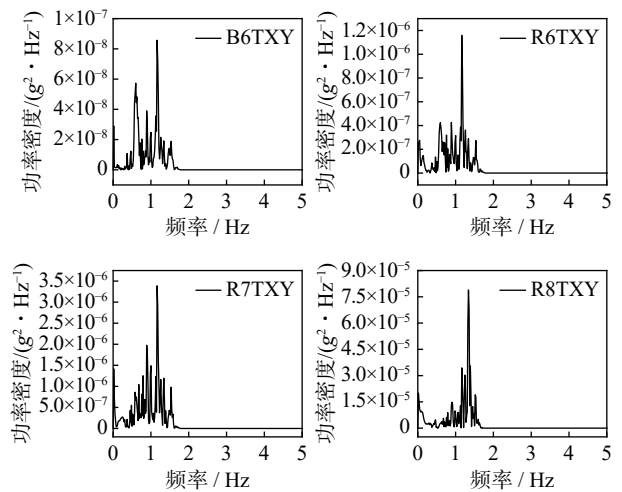


图 9 加速度功率密度

Fig. 9 Acceleration power density

下结构 X 向加速度放大系数峰值出现在结构顶层, 在 Y 向、双向地震激励下结构 Y 向加速度放大系数峰值出现在结构第一层顶板处; Y 向地震激励下结构 Y 向加速度放大系数比 X 向地震激励下结构 X 向加速度放大系数大, 这是由于结构在 X 向的刚度较 Y 向大, 抵抗地震作用的能力更强。从图 10 还可以看出, 随着地震强度的增大, 各层的加速度放大系数在增加, 这是由于结构处于弹性阶段, 加速度放大系

数随输入能量的增加而增大。图 10(c) 和 (d) 中, 在工况 R6TXY 到工况 R7TXY 时加速度放大系数突减, 其原因是拧紧了柱间斜杆支撑, 结构刚度变大。

从图 10(a) 和 (b) 可以看出, 在相同烈度水准的加速度输入下, 地震动的频谱成分对结构加速度反应有较为显著的影响。鉴于本文研究中所采用北京人工地震的频带宽度远大于 El Centro 地震记录和 Taft 地震记录, El Centro 地震记录和 Taft 地震记录的

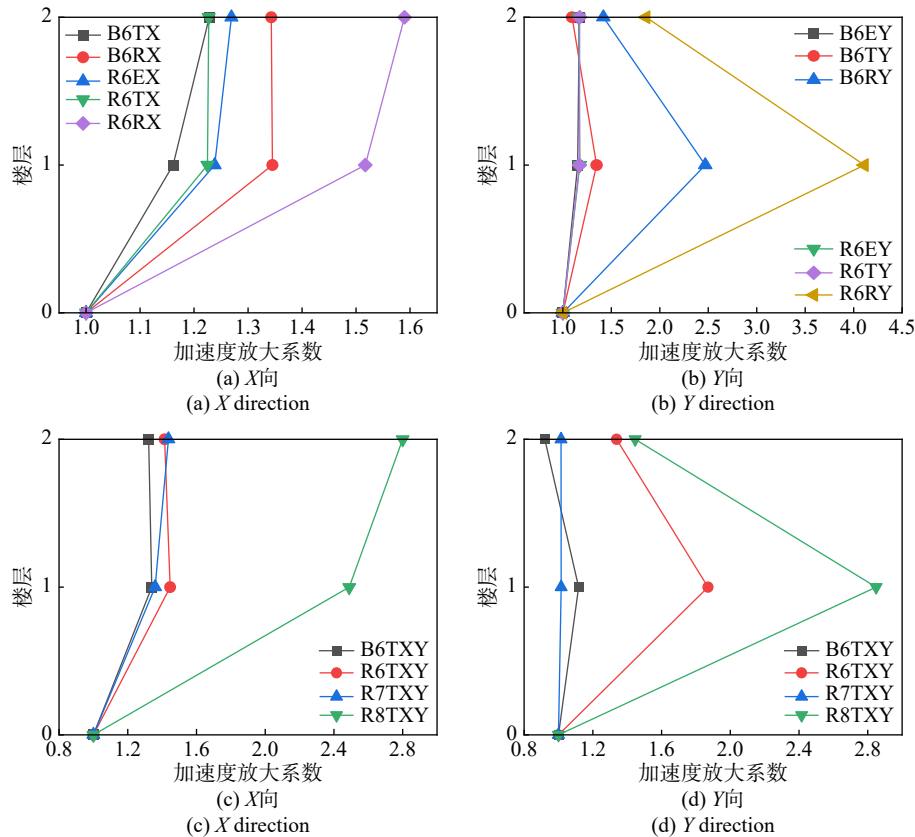


图 10 结构的加速度放大系数

Fig. 10 Acceleration amplification factor of structure

能量主要集中在 0~3 Hz 之间,北京人工地震记录的频谱成分较 El Centro 地震记录和 Taft 地震记录要丰富许多,在 0~15 Hz 之间能量均较突出;而试验模型两个方向的自振频率为 3.27 Hz(X 向水平)和 3.14 Hz(Y 向水平),北京人工地震记录中与结构自振频率相近成分可使模型结构产生共振,导致北京人工地震作用下的结构反应较 El Centro 地震和 Taft 地震更大。

2.5 层间位移

对加速度时程曲线进行二次积分,可得到结构各楼层顶板处的位移时程,进而得到模型结构各楼层的相对位移。图 11 给出了各工况下模型结构最大相对位移随楼层的变化。图 11 表明,由于该轻框结构体系 X 向侧向刚度大于 Y 向侧向刚度,在相同的地震激励下结构 X 向的相对位移总是小于 Y 向的相对位移;随着地震作用的增大,各层的相对位移随之增加,由于地震能量由一些非承重构件耗散掉,钢框架始终保持弹性状态,随输入能量的增加变形逐渐增加。由于模型结构的北侧开有窗口,在结构 X 向的刚度呈不均匀分布,故在不同地震作用下 X 向相对位移呈现出不一致,且在单向地震输入下结构出现了扭转变形。

用层间相对位移除以各层的层高即得到层间位移角,由于各个工况下 X 向相对位移均小于 Y 向相

对位移,本文只统计了各个工况下结构 Y 向最大的层间位移角的变化,如图 12 所示。由图 12 可知,本试验模型结构的地震反应与输入地震动特性有关,输入 El Centro 地震时反应最小,输入 Taft 地震时反应最大,输入北京人工地震时的反应居中。整体来看,随着地震作用的增强,模型结构的层间位移角呈上升的趋势。由于实施 R7TXY 工况前通过拉紧柱间拉杆提高了结构刚度,结构变形减少,该工况下各层的层间位移角小于 R6TXY 工况。在 R8TXY 工况下,柱间拉杆支撑大量断开,各层位移角明显增加。在 6 度罕遇 Taft 地震、7 度罕遇 Taft 地震、8 度罕遇 Taft 地震作用下,结构的层间位移角超过了 1/250,但试验中结构未出现倒塌。

2.6 应变响应

图 13 给出了 R8TXY 工况下模型结构各个测点的应变响应的最大值和最小值。其中, s1~s6、s13 分别对应柱脚的位置, s7~s12 分别对应一层柱顶的位置, s14 为模型结构一层梁下表面位置。

由图 13 可知,由于门洞开口减弱了结构刚度,边柱一层柱顶 Y 向(测点 s10)应变最大;由于试验过程中柱间拉杆支撑发生断裂,结构刚度降低,柱顶处的应变大于柱脚处的应变; s14 的应变均为负值,表明该点处梁仅受压,应变值小于柱上各点的应变值,

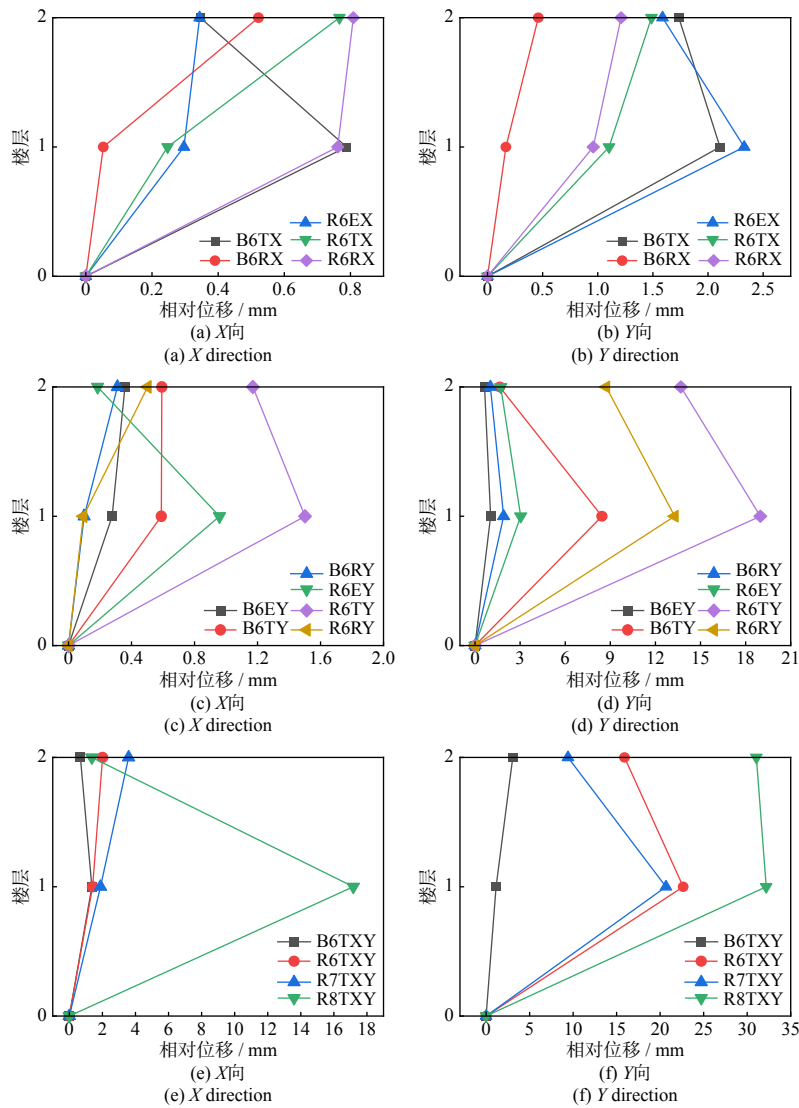


图 11 层间相对位移

Fig. 11 Relative displacement between layers

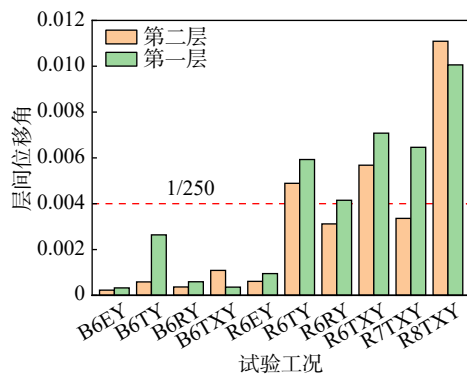


图 12 各工况下结构 Y 向层间位移角

Fig. 12 Structural interlayer displacement angle in Y direction under various operating conditions

说明本试验模型中梁的承载能力有较大冗余。

3 振动台试验的数值模拟

为了验证本次振动台模型试验结果的可靠性,

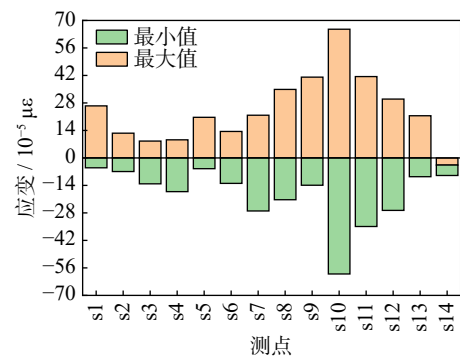


图 13 R8TXY 工况下测点应变峰值

Fig. 13 Peak strain at the measuring point under R8TXY condition

并为后续深入研究奠定基础, 针对本次振动台试验进行了有限元数值模拟。

3.1 模型建立

根据试验情况建立同等尺寸的有限元模型, 在

柱底施加约束,如图 14 所示。钢框架采用三维有限应变梁单元 beam188 模拟,ALC 墙板采用壳单元 shell181 模拟,楼板、屋顶质量采用 mass21 质量单元模拟。在各层顶板位置、钢屋架之间设置直径 14 mm 的拉杆支撑,来提高结构整体刚度。ALC 墙板固定在钢框架四周设置的螺栓上,不考虑相邻墙板之间的连接。梁柱连接采用节点融合,试验中梁柱为半刚性连接,但需要注意的是,这种处理会使数值结果偏小。数值模型采用如下假定:①假定螺栓连接牢固,不发生破坏;②梁柱连接可靠;③钢框架与 ALC 墙板位移协调。

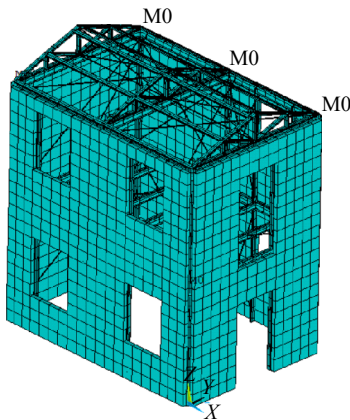


图 14 外挂 ALC 墙板-钢框架结构有限元模型

Fig. 14 Finite element model for the external ALC wall panel-steel frame

钢构件采用理想弹塑性本构模拟,材料参数根据表 1 取值,泊松比取值为 0.28,弹性模量取值为 2.06×10^5 MPa。ALC 墙板采用混凝土模型模拟,抗压强度取值为 3.5 MPa,泊松比取值为 0.2,密度取值为 491 kg/m^3 ,弹性模量取值为 2.2×10^4 MPa。

3.2 结果分析

对所建立的数值模型进行模态计算,得到框架结构的自振频率,如表 4 所示,第 1、2 阶为结构水平方向频率,第 3 阶为扭转频率。由表 4 可知,本文所建有限元模型的频率与试验的频率基本吻合。

表 4 结构自振频率

Tab. 4 Natural frequency of the structure

频率阶数	数值结果/Hz		试验结果/Hz
	钢框架	ALC墙板-钢框架	
1	3.08	3.13	3.14
2	3.10	3.49	3.27
3	3.92	5.11	

由于数值模型没有建立基础混凝土台座,因此,直接输入振动台试验中测得的 R6RX 工况柱脚位置处的 X 向加速度记录,进行数值计算后,提取对应监测点处的加速度响应,将其与振动台试验结果一起

绘于图 15。可以看出,有限元模型计算结果与试验结果吻合较好,计算得到的加速度时程略低于试验数据,主要原因为:有限元模型中梁柱、墙板连接较振动台试验更加理想,整体刚度较好。

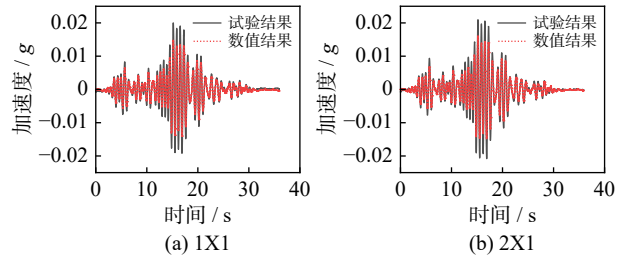
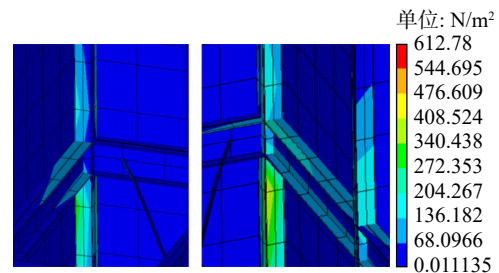


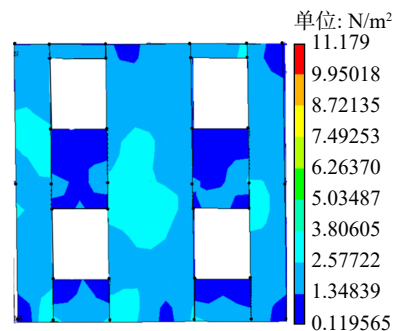
图 15 加速度时程曲线

Fig. 15 Acceleration time-history curves

图 16 给出了数值计算得到的结构应力云图。由图 16(a)可知,梁柱节点处,应力最大值出现在节点下方的钢柱上,钢梁应力较小,且主要分布在翼缘部分。故在实际工程中可对钢梁进行优化,使轻框结构满足“强柱弱梁”的抗震设计要求。由图 16(b)可以看出,ALC 墙板应力值较小,应力集中在墙板接缝、连接螺栓处,且在墙底部,应力沿着连接螺栓、连接缝呈三角形分布,在二层楼底板处,墙板应力在连接螺栓处沿着接缝呈半圆形分布。



(a) 梁柱节点
(a) Beam-column joints



(b) 南侧结构墙板
(b) Structural wall panel on the south side

图 16 结构应力云图

Fig. 16 Structural stress nephogram

通过有限元计算结果与振动台试验结果的对比,说明本次振动台试验模型的构件连接可靠,试验结果合理。同时,亦验证了数值模型的合理性,为后续轻框结构体系抗震性能深入研究奠定了基础。

4 结 论

针对新农村建设设计了一种以钢框架作为结构主体外挂 ALC 墙板的轻框结构体系住宅,利用振动台试验对其抗震性能进行了检验,并得到如下结论:

(1)在本文试验工况中,随着输入地震强度增加,相同位置高度处轻框架结构的加速度放大系数、相对位移逐渐增大,结构主体构件一直保持弹性状态。

(2)设置于柱间的拉杆支撑,大大地提高了结构的刚度,有效地减小了结构的地震响应。

(3)试验模型的节点连接可靠,梁柱节点、柱脚连接节点、墙板连接完好,未出现螺栓、墙板脱落现象。

(4)在 8 度罕遇地震作用下,该轻框结构体系没有倒塌,构件无脱落,满足“大震不倒”的抗震设防要求。

(5)该轻框结构体系可用于 6 度抗震设防区农村住房建设,对于 6 度以上抗震设防区亦可利用增大斜杆拉力等措施增强其抗震性能,拉杆布设于钢框架柱之间,便于更换。

(6)在实际工程实施中需对门窗开洞处进行加固处理,增强结构刚度,消除扭转变形。

(7)建立的轻框结构有限元模型合理,为后续深入研究奠定了基础。

参考文献:

- [1] 孟祥君. 蒸压加气混凝土砌块隔墙板受力性能研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
MENG Xiangjun. Study on mechanical performance of autoclaved aerated concrete block partition board[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.
- [2] 刘平, 孙奇. 加气混凝土复合夹芯保温砌块物理力学性能研究 [J]. 混凝土, 2010(5): 108-110.
LIU Ping, SUN Qi. Research on the physical and mechanical properties of autoclaved aerated concrete thermal insulation block[J]. Concrete, 2010(5): 108-110.
- [3] 徐怡婷. 装配式轻质 ALC 复合条板抗弯性能试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
XU Yiting. Experimental study on bending behavior of assembled lightweight ALC composite strip boards[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2020.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑隔墙用轻质条板通用技术要求: JG/T 169—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
MOHURD. General technical requirements of light weight panel used for building partition: JG/T 169 —2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [5] 李志刚, 姚向辉, 王银瑞. 钢框架中盖板加强型节点的抗

震性能分析 [J]. 兰州工业学院学报, 2013, 20(6): 50-53.

LI Zhigang, YAO Xianghui, WANG Yinrui. Analysis of the seismic performance in the cover-plate reinforced connection in steel frame[J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2013, 20(6): 50-53.

- [6] 杜俊, 印真, 陈力奋. 梁柱半刚性连接对钢结构整体抗震性能的影响研究 [J]. 动力学与控制学报, 2013, 11(2): 172-177.

DU Jun, YIN Zhen, CHEN Lifan. The effects of semi-rigid joints on the seismic behaviors of steel structure[J]. Journal of Dynamics and Control, 2013, 11(2): 172-177.

- [7] 施刚, 石永久, 王元清, 等. 多层抗震钢框架端板连接设计的若干问题 [J]. 钢结构, 2004, 19(3): 1-3.

SHI Gang, SHI Yongjiu, WANG Yuanqing, et al. Comments on design method of end-plate connection in multi-story seismic steel frames[J]. Steel Construction, 2004, 19(3): 1-3.

- [8] 刘学春, 王丹, 张爱林, 等. L 形钢管混凝土柱-H 型钢梁全螺栓装配节点抗震性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 42-58.

LIU Xuechun, WANG Dan, ZHANG Ailin, et al. Seismic performance of a bolt-assembled connection for L-shaped concrete-filled steel tubular columns and H-shaped steel beams[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(1): 42-58.

- [9] 刘学春, 崔小雄, 张爱林, 等. 修复后方钢管柱与 H 型钢梁全螺栓双夹板连接节点抗震性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(11): 39-47.

LIU Xuechun, CUI Xiaoxiong, ZHANG Ailin, et al. Experimental study on seismic performance of H-section beam to square steel pipe column bolted double-splint connection after repair[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(11): 39-47.

- [10] 张爱林, 张勋, 刘学春, 等. 钢框架-装配式两边连接薄钢板剪力墙抗震性能试验研究 [J]. 工程力学, 2018, 35(9): 54-63.

ZHANG Ailin, ZHANG Xun, LIU Xuechun, et al. Experimental study on seismic behavior of steel frame with prefabricated beam-only connected steel plate shear wall[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(9): 54-63.

- [11] 张士昌, 徐晓明. 沈阳奥体中心游泳馆结构抗震计算分析 [J]. 钢结构, 2016, 31(4): 32-34.

ZHANG Shichang, XU Xiaoming. Seismic calculation and analysis of the integral structure of Shenyang Olympic natatorium[J]. Steel Construction, 2016, 31(4): 32-34.

- [12] ZHANG A L, LIU X C, MOIU J L. Model test research on seismic performance of the long-span steel structure C1 of Beijing Daxing International Airport Terminal[J]. Steel Construction, 2020, 35(2): 1-12.

- [13] 张爱林, 王小青, 刘学春, 等. 北京大兴国际机场航站楼大跨度钢结构整体缩尺模型振动台试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42(3): 1-13.

ZHANG Ailin, WANG Xiaoqing, LIU Xuechun, et al. Shaking table test on overall-scale model of long-span steel

- structure of Beijing Daxing International Airport terminal[J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(3): 1-13.
- [14] 李雄彦, 刘人杰, 景辉, 等. 面向工程的大跨度空间结构动力缩尺模型设计制作方法 [J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(12): 267-275.
LI Xiongyan, LIU Renjie, JING Hui, et al. Engineering-oriented design method of dynamic scale model of large-span spatial structure[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(12): 267-275.
- [15] 刘玉姝, 李国强. 带填充墙钢框架结构抗侧力性能试验及理论研究 [J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(3): 78-84.
LIU Yushu, LI Guoqiang. Experimental and theoretical research on lateral load resistance of steel frames with infilled walls[J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(3): 78-84.
- [16] 赵滇生, 陈亮, 王伟伟. 带 ALC 墙板的钢框架结构滞回性能分析 [J]. *浙江工业大学学报*, 2010, 38(4): 448-452.
ZHAO Diansheng, CHEN Liang, WANG Weiwei. Hysteretic behavior analysis of steel frame structure with ALC walls[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2010, 38(4): 448-452.
- [17] KARADUMAN A, POLAT Z, KALTAKCI M Y. Statical analysis of infilled frames[C]//7th International Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Historical Buildings. 2001.
- [18] TEEUWEN P A, KLEINMAN C S, SNIJDER H H, et al. Experimental and numerical investigations into the composite behaviour of steel frames and precast concrete infill panels with window openings[J]. *Steel & Composite Structures*, 2010, 10(1): 1-21.
- [19] 戴绍斌, 余欢, 黄俊. 填充墙与钢框架协同工作性能非线性分析 [J]. *地震工程与工程振动*, 2005, 25(3): 24-28.
DAI Shaobin, YU Huan, HUANG Jun. Non-linear analysis of coordinated working performance between infilled wall and steel frame[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2005, 25(3): 24-28.
- [20] 胡精武, 徐锋, 杜东升, 等. 整体钢框架内嵌加气混凝土填充墙板足尺模型振动台试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(6): 141-148.
HU Jingwu, XU Feng, DU Dongsheng, et al. Experimental study on shaking table test of full-scale steel frame with embedded autoclaved lightweight concrete wall panels[J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(6): 141-148.
- [21] 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): 22-26.
WANG Xueqin, LIU Xuechun, MA Lin, et al. Experimental research on seismic behavior of prefabricated alc external panels[J]. *Steel Construction*, 2017, 32(4): 22-26.
- [22] 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): 147-153.
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(Sup 1): 147-153.
- [23] 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): 56-61.
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(Sup 2): 56-61.
- [24] 田海, 陈以一. ALC 拼合墙板受剪性能试验研究和有限元分析 [J]. *建筑结构学报*, 2009, 30(2): 85-91.
TIAN Hai, CHEN Yiyi. Experimental research and finite element analysis on lateral shearing behavior of ALC spliced-connection wallboard[J]. *Journal of Building Structures*, 2009, 30(2): 85-91.
- [25] 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.
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.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
MOHURD. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [27] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 蒸压加气混凝土板: GB/T 15762—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
SAMR, NSA. Autoclaved aerated concrete slabs: GB/T 15762—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建筑幕墙抗震性能振动台试验方法: GB/T 18575—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Shaking table test method for seismic performance of curtain wall: GB/T 18575—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

第一作者: 倪泽阳(1988—), 男, 学士, 工程师。

E-mail: nizeyang@bnbm.com.cn

通信作者: 李立云(1973—), 男, 博士, 教授。

E-mail: lly@bjut.edu.cn