

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.01.012

HIC 墙板-钢框架结构拟静力试验研究

焦立人¹, 周 安¹, 蒋 民¹, 杨 龙¹, 焦志安², 朱 华³

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 绿色建筑与装配式建造安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230032; 3. 安徽省建筑科学研究设计院, 安徽 合肥 230031)

摘 要:为研究不同连接方式下中空内模水泥(hollow inner-formwork cement, HIC)墙板-钢框架结构的抗震性能, 文章设计了 2 种内嵌式连接方式。通过对 1 榀钢结构空框架足尺试件和 2 榀内嵌 HIC 墙板的钢框架足尺试件进行拟静力试验, 分析不同试件的破坏特征、承载力与变形性能、刚度退化和耗能能力, 综合评估该结构的抗震性能。研究表明:内嵌式连接下, HIC 墙板-钢框架结构的抗侧刚度提高 3.31 倍以上, 峰值承载力提升 29% 以上, 延性系数达到 6.20, 最终破坏时的总耗能增加约 47%; 结构塑性开展过程稳定有序, 墙板与钢框架采用“梁上点连接”或“周边线连接”时, 结构的破坏模式存在差异, 但两者均能提供安全可靠的连接效果。

关键词:墙板-框架结构; 内嵌围护墙板; 抗侧力结构; 拟静力试验; 抗震性能

中图分类号: TU398.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)01-0077-06

Pseudo-static test on HIC wall panel-steel frame structure

JIAO Liren¹, ZHOU An¹, JIANG Min¹, YANG Long¹, JIAO Zhi'an², ZHU Hua³

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Green Building and Assembly Construction, Hefei 230032, China; 3. Anhui Institute of Building Research and Design, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of hollow inner-formwork cement(HIC) wall panel-steel frame structure under different connection methods, two types of embedded connection methods were designed. The damage characteristics, bearing capacity, deformation performance, stiffness degradation and energy dissipation capacity of the different specimens were analyzed by pseudo-static test on one-bay full-scale specimen of empty steel frame and two-bay full-scale specimens of steel frame with embedded HIC wall panels, and the seismic performance of the structure was evaluated comprehensively. The results showed that the lateral stiffness of HIC wall panel-steel frame structure with embedded connection increased by more than 3.31 times, the peak bearing capacity increased by more than 29%, the ductility coefficient reached 6.20, and the total energy consumption at the final failure increased by about 47%. The plastic processes of the structure were stable and orderly, in which the structural damage modes differ when the HIC wall panels were connected to the steel frame by beam point connection or perimeter line connection, but both of them were safe and reliable.

Key words: wall panel-frame structure; embedded enclosure wall panel; lateral-force resisting structure; pseudo-static test; seismic performance

钢结构轻质高强、施工快捷, 在建筑工业化大背景下有着装配式的先天优势。钢框架结构在中、高层建

筑中广泛应用, 但依然存在不足, 围护体系发展滞后就是亟待解决的问题之一。围护墙板不配套、墙板-钢框

收稿日期: 2022-05-25; 修回日期: 2022-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51778202)

作者简介: 焦立人(1997—), 男, 安徽明光人, 合肥工业大学硕士生;

周 安(1964—), 男, 安徽绩溪人, 博士, 合肥工业大学教授, 硕士生导师;

朱 华(1964—), 男, 安徽合肥人, 安徽省建筑科学研究设计院正高级工程师, 硕士生导师。

架结构相关的规范和标准不完善等已成为装配式钢结构建筑推广与应用的制约因素^[1]。

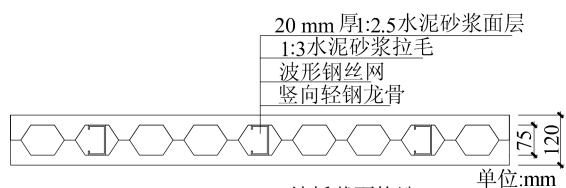
本文引入一种新型中空内模水泥(hollow inner-formwork cement, HIC)墙板,作为钢框架的围护构件。该型墙板已在云南、安徽等地的部分工程中试点应用,但尚未普及,目前多用于混凝土结构建筑中,少见于钢结构建筑中。实际震害表明,框架结构的围护构件和填充墙在地震作用下破坏较重^[2],因此有必要针对该型墙板与钢框架组成的结构开展抗震性能研究。国内外学者对墙板-框架结构已开展了一些试验研究^[3-8]和数值分析^[9-11],但对 HIC 墙板的探索较少,缺少必要的试验数据和成熟的设计依据。本文分析拟静力试验下 HIC 墙板-钢框架结构的抗震性能,研究成果将为该结构后续的研究、设计和工程应用提供参考。

1 试件参数

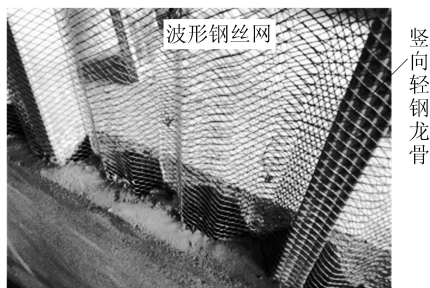
试验设计了 3 个试件、1 榀钢结构空框架和 2 榀 HIC 墙板-钢框架试件,HIC 墙板与钢框架的连接方式不同。

1.1 HIC 墙板

HIC 墙板构造如图 1 所示,由轻钢龙骨、波形钢丝网和水泥砂浆面层组成,墙板竖向含垂直空腔,自重较轻,且方便布置管线及填充保温、隔热和防火材料;钢丝网与轻钢龙骨可根据需要组合成不同截面形状和厚度,具有极大的可塑性。



(a) HIC 墙板截面构造



(b) HIC 墙板内部构造

图 1 HIC 墙板构造

1.2 钢框架

框架采用热轧 H 型钢,钢梁规格为 HN250×125×6×9 型,钢柱规格为 HW200×200×8×

12 型;梁柱节点采用梁外伸式端板加高强螺栓连接,属于半刚性连接节点,构造简单、施工便捷,安装质量容易得到保证,因此在结构试验及实际工程中应用广泛。各部件的试件尺寸如图 2 所示。

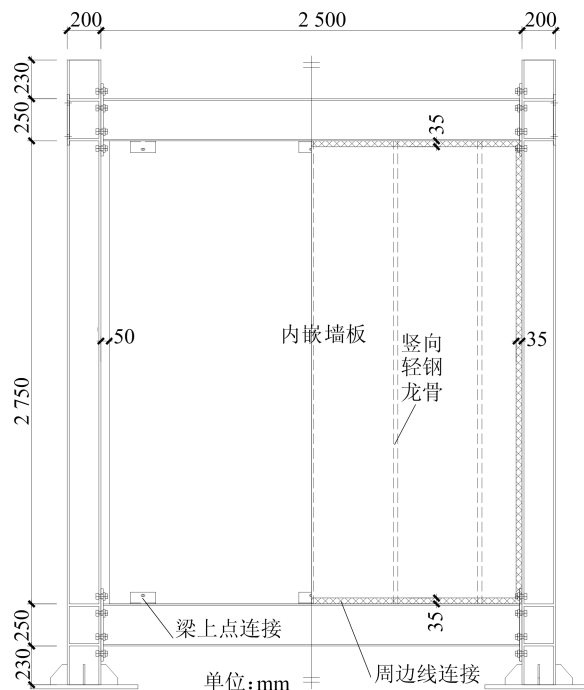
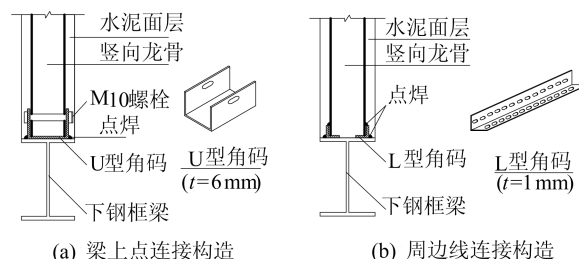


图 2 试件尺寸示意图

1.3 墙板与框架的连接构造

① 梁上点连接。墙板上、下边沿通过 U 型角码与框架梁紧密连接,墙板两侧与框架柱之间预留间隙不接触。试件 QK1 采用该连接构造,如图 2 左侧所示。② 周边线连接。墙板四周通过 L 型角码与框架梁、柱均紧密连接。试件 QK2 采用该连接构造,如图 2 右侧所示,图中阴影表示周边线连接区域。2 种构造的连接件与框架梁、柱均通过点焊连接,即 U 型角码和 L 型角码均焊接固定在框架上。连接件与墙板的连接方式不同,分别为螺栓和焊接连接,其中螺栓连接件采用 M10 普通螺栓,墙板与框架的连接构造如图 3 所示。试件 QK2 中墙板与框架柱的连接构造与图 3b 类似。各试件主要参数见表 1 所列。



(a) 梁上点连接构造

(b) 周边线连接构造

图 3 墙板与框架的连接构造

表 1 各试件主要参数

试件编号	试件类型	连接件	连接方式
KKJ	空框架		
QK1	内嵌墙板框架	U 型角码	梁上点连接
QK2	内嵌墙板框架	L 型角码	周边线连接

1.4 材料性能

框架及角码连接件均采用 Q355B 级钢材,墙板内竖向龙骨采用 Q235 级镀锌钢板,墙板面层为普通水泥砂浆。材料实测强度见表 2 所列。

表 2 材料实测强度

材料类别	强度	实测值/MPa
Q355 钢材	屈服强度	360.58
	极限强度	530.94
Q235 钢材	屈服强度	236.70
	极限强度	348.60
水泥砂浆	立方体抗压强度	14.97

2 试验方案

2.1 试验装置

试验加载装置如图 4 所示。框架柱脚通过高强螺栓与刚性地面进行刚性连接,框架顶通过连接耳板与加载头、作动器等装置连接固定。为防止试件侧倾失稳,每根钢柱两侧分别设置钢丝绳进行约束。

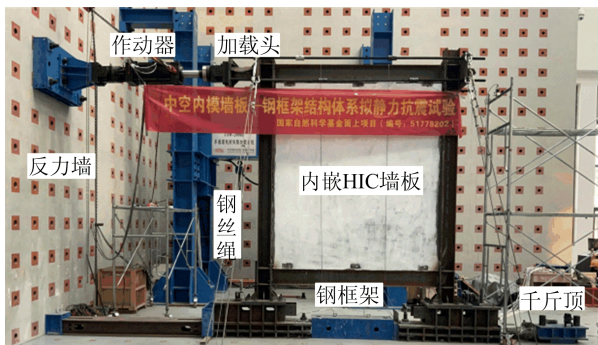


图 4 试验加载装置

2.2 加载方案及量测内容

基于试验规程^[12],结合实际试验条件拟定了加载制度如图 5 所示。试验加载全程采用位移控制,直接通过作动器施加水平低周往复荷载。为消除试件在装配过程中产生的非弹性变形,保证各构件间及试件与试验装置之间紧密接触,正式加载前先进行预加载,水平位移从 0 加载至 6 mm 再卸载归 0,往复循环 3 次。预加载完成后开始

分级进行正式加载,设定作动器前推为正,后拉为负。以多、高层钢结构弹性层间位移角限值 $[\theta_e]$ ^[13]对应的位移 12 mm($[\theta_e]=0.4\%$)作为结构的屈服位移 Δ_y ,进行慢速连续加载。结构屈服前分 3 级加载,以 0.25 Δ_y 、0.50 Δ_y 、0.75 Δ_y 分别循环 1 次;屈服位移 Δ_y 下循环 3 次;接着以该位移为增量,逐级增大,分别以 1 Δ_y 、2 Δ_y 、3 Δ_y 、...作为加载控制位移,每 1 级位移循环加载 3 次。

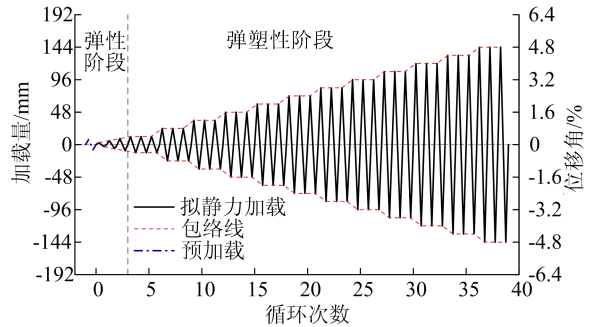


图 5 试验加载制度图

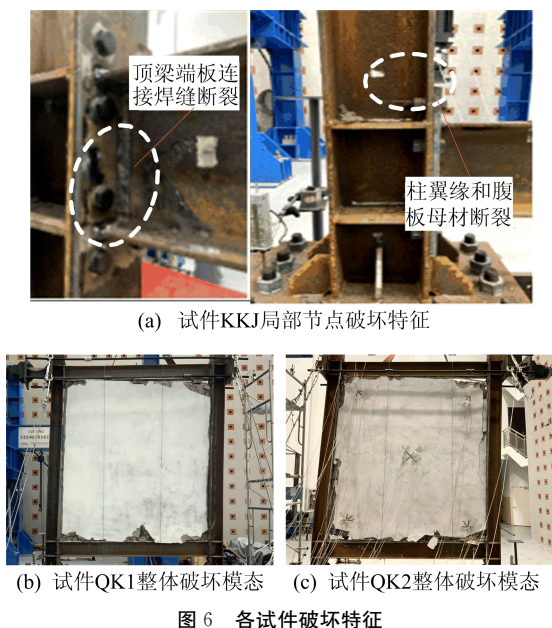
3 试件受力破坏特征

空框架试件在加载初期无明显损伤,进入塑性阶段后,柱底部最先屈服,随着加载位移增加,框架变形增大、抗侧刚度降低,最终框架节点域屈曲变形、梁端及柱脚的焊缝和母材断裂,结构破坏。

内嵌墙板的框架试件,初始刚度相较于空框架提升明显,框架与墙板构件共同受力、协调变形,表现出良好的整体受力性能。加载过程中,连接件及框架约束了墙板平面内、外变形,同时墙板对框架起到支撑作用。随加载位移增加,墙板与连接件及框架的接触区域依次损伤开裂,试件刚度逐步降低,墙板与框架间的滑移逐渐增大。试验后期,加载位移大,各连接件陆续失效,墙板与框架间基本依靠摩擦力及挤压力共同工作,墙板与框架形成对角斜撑受力机制。加载全程,两试件的框架节点域变形程度均小于空框架试件,加载末期墙板及连接件几乎完全破坏,但钢框架构件并未出现与试件 KKJ 类似的焊缝或钢材断裂现象,表现出稳定有序的塑性开展过程。

采用梁上点连接的试件 QK1,裂缝出现较早,表现出更明显的脆性,裂缝及墙板填料剥脱区域主要集中于各连接点附近,墙板面层的破坏程度相对更严重。采用周边线连接的试件 QK2,墙板裂缝及填料剥脱区域主要集中于墙板与框架的

接触面边沿, L 型角码连接件及墙板内部竖向轻钢龙骨、构造钢筋的破坏相对更严重。各试件破坏特征如图 6 所示。



4 试验结果与分析

4.1 滞回曲线与骨架曲线

各试件的荷载-位移滞回曲线如图 7 所示。

加载过程根据曲线形态可分为线弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段及破坏阶段。加载位移角 $0 < \theta \leq 0.4\%$ 时, 试件基本处于线弹性阶段, 曲线大致呈直线状态; $0.4\% < \theta \leq 0.8\%$ 时, 试件开始转入弹塑性阶段。承载力随位移的增长速率放缓, 曲线出现了残余变形, 同时开始呈现不同形态, 空框架曲线呈弓形分布, 内嵌墙板的框架则呈反 S 形分布, 反映出更多的滑移影响; $0.8\% < \theta \leq 3.2\%$ 时, 试件进入塑性阶段, 加载位移增加, 承载力增长愈发缓慢, 同时伴随结构刚度降低。 $\theta > 3.2\%$ 时, 结构承载力开始降低, 曲线进入下降阶段。在试验的最后一级循环, 各试件加载位移角分别达到了 4.8% 、 4.0% 、 4.8% , 结构表现出良好的承载能力和较为稳定的循环性能。

骨架曲线能反映出结构各阶段受力特性, 各试件骨架曲线对比如图 8 所示, 曲线关于坐标原点基本呈中心对称。空框架的曲线初始斜率更低、承载力随加载位移的增长更慢、峰值承载力更低、曲线到达峰值荷载点相对更晚, 峰值荷载点过后, 曲线下降也更缓。结果表明, 内嵌 HIC 墙板对于结构抗侧承载性能和变形性能的提高具有明

显的积极作用。

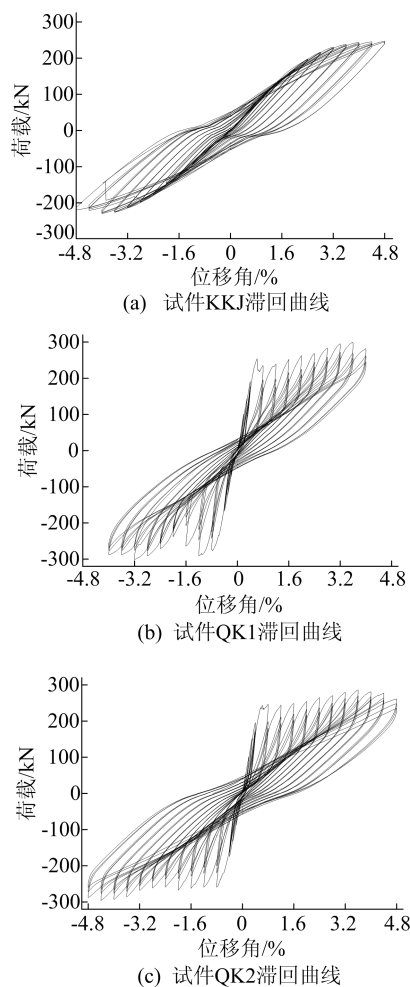
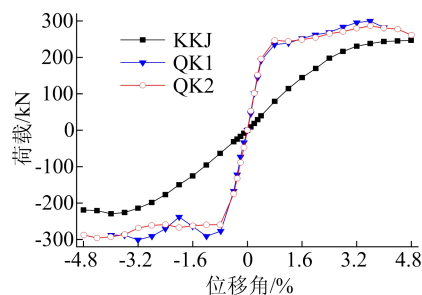


图 7 各试件荷载-位移滞回曲线



4.2 荷载和位移特征值

取各试件骨架曲线的屈服点、荷载峰值点和加载极限点作为特征点。屈服点采用 R. Park 法对曲线求解后得到, 荷载峰值点取曲线拐点, 加载极限点取曲线最终点。试件加载结束点的正负向承载力虽未全部降到峰值承载力的 85% , 但加载末期位移角已远大于 $1/50$, 且试件局部破坏严重, 甚至出现墙板凹陷、偏心等现象, 出于安全考虑终止加

载。根据文献[14]可取曲线的最终点作为极限点。 试件特征点的特征值及延性系数见表 3 所列。

表 3 试件特征点的特征值及延性系数

试件编号	加载方向	屈服点	荷载峰值点	极限点		延性系数	
		$\theta_y/\%$	P_{max}/kN	$\theta_u/\%$	P_u/kN	μ	均值
KKJ	推	2.94	245.34	>4.80	239.47	>1.63	>1.59
	拉	3.11	229.39	>4.80	212.44	>1.55	
QK1	推	0.90	299.81	>4.00	281.98	>4.45	>4.71
	拉	0.81	301.23	>3.99	285.99	>4.96	
QK2	推	0.73	286.36	>4.80	261.23	>6.62	>6.20
	拉	0.83	295.71	>4.79	287.82	>5.78	

试件正、负向特征点的荷载值有一定差异,原因在于:试件正负向塑性发展程度不一致,水泥砂浆作为拉压非对称材料,损伤对结构抗侧刚度影响较大;同时加载装置与试件间存在滑移,受拉循环时缝隙大、实际加载位移小,承载力低;反之,受压循环时缝隙小,承载力高。

内嵌墙板框架在屈服点过后,经较长的平台期到达荷载峰值点,说明试件在屈服后仍有安全储备。2 种连接方式下结构的峰值承载力提升显著,分别为空框架的 1.31 倍和 1.29 倍。结果表明内嵌 HIC 墙板有利于提高结构抗侧承载力。

4.3 刚度退化

试验过程中结构的侧移刚度存在退化现象,为更精确地描述这一过程,用割线刚度 K 随加载级数(Δ/Δ_y)的变化曲线来评价刚度退化程度,曲线对比如图 9 所示。

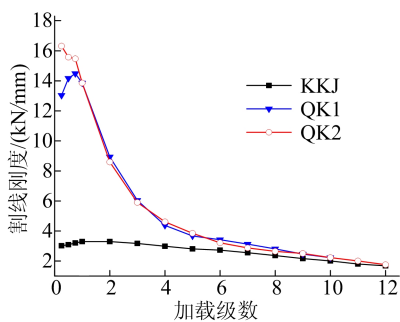


图 9 各试件刚度退化曲线对比

从图 9 可以看出,内嵌墙板的框架的初始刚度远大于空框架,分别为空框架试件的 4.31 倍和 5.40 倍。试件在 $1\Delta_y$ 之前有短暂的刚度上升段,原因在于作动器与框架之间存在间隙,前期加载位移小,间隙对试验影响大,随加载位移增加,影响被不断削弱。梁上点连接试件的墙板与框架柱之间有预留间隙,随加载位移增加,连接逐渐加

强,抗侧刚度逐步增大。边线连接试件的墙板四周与框架均紧密连接,初始加载,抗侧刚度处于峰值,随加载进行,墙板不断损伤开裂,试件的抗侧刚度逐渐降低。

各试件的抗侧刚度在 $1\Delta_y$ 后开始下降,刚度退化与水泥损伤、龙骨屈曲变形、连接件失效、框架焊缝断裂等因素相关。其中内嵌墙板的框架刚度退化前期快后期慢,主要归因于水泥的损伤。加载前期损伤开裂发展迅速,结构刚度退化速率快,但墙板压溃、剥脱甚至与框架产生脱空后,同样的加载级差对试件的损伤影响程度降低,则刚度退化速率越来越慢。各试件最终的抗侧刚度接近,此时各试件中墙板及连接件均破坏严重,残余刚度基本是钢框架所贡献的。

结果表明,内嵌 HIC 墙板显著提高了结构抗侧刚度,不同连接方式对刚度退化的影响不明显。

4.4 延性性能

根据规范^[13],多、高层钢结构弹性层间位移角限值 $[\theta_e]=1/250=0.4\%$,弹塑性层间位移角限值 $[\theta_p]=1/50=2\%$ 。表 3 中各试件屈服位移角 θ_y 均远大于 $[\theta_e]$,极限位移角 θ_u 均远大于 $[\theta_p]$ 。

由于内嵌墙板的框架刚度增加,墙板对框架的支撑作用加大,结构屈服位移降低,故结构的延性系数增加。结果表明,HIC 墙板-钢框架结构有着良好的塑性变形能力。

4.5 耗能性能

选取各试件的能量耗散系数、等效黏滞阻尼系数及总耗能(加载结束点各试件对应的累计能量面积)对结构的耗能性能进行分析。耗能曲线对比如图 10 所示,总耗能对比见表 4 所列。

由图 10 可知,空框架试件加载前期耗能能力弱,耗能能力随加载位移增加而逐渐提高。内嵌墙板的框架试件的耗能能力在加载初期远高于空框架,随着加载位移的增大,墙板在与框架的连接

处局部损伤开裂,耗能能力不断衰减。 $2\Delta_y$ 时,两试件耗能能力经历短暂的上升期,原因在于此时加载位移接近各试件的真实屈服位移,同时 $1\Delta_y$ 后,空框架耗能能力增长明显,亦有利于结构整体耗能能力提高。加载末期,试件中墙板部件与框架部件的连接基本失效,内嵌 HIC 墙板及连接件的耗能性能退化殆尽,此阶段各试件均主要依靠钢框架耗能。

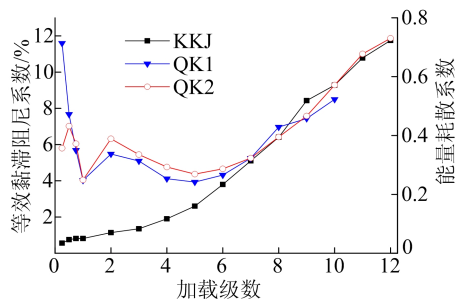


图 10 各试件耗能曲线

表 4 各试件总耗能

位移角 $\theta/\%$	总耗能/(kN·m)		
	KKJ	QK1	QK2
4.00	181.69	206.71	211.36
4.80	249.19		367.15

取相同的加载位移阶段,对表 4 各试件的总耗能进行增幅比较。其中,周边线连接试件与梁上点连接试件耗能能力相近,总耗能相差约 2.25%;与空框架相比,梁上点连接试件最终破坏时的总耗能增加了约 13.77%,周边线连接试件最终破坏时的总耗能增加了约 47.34%。

试验结果表明,在一定范围内,内嵌 HIC 墙板对结构的耗能能力具有显著影响,墙板与框架间连接方式对于结构耗能性能的影响不明显。

5 结 论

1) HIC 墙板-钢框架结构的屈服位移角远大于多、高层钢结构弹性层间位移角限值,极限位移角远大于弹塑性层间位移角限值,说明梁上点连接或周边线连接均能提供安全可靠的连接。

2) 2 种连接构造下,结构破坏模式存在明显差异。前者的损伤区域集中于各连接点附近墙板面层,后者集中于墙板与钢框架的接触面边沿。

3) 与空框架结构相比,HIC 墙板-钢框架结构的抗侧刚度提高了 3.31 倍以上,峰值承载力增

长了 29% 以上,延性系数达到 6.20,最终破坏时的总耗能增加 47% 以上。

[参 考 文 献]

- [1] 舒赣平,周雄亮,王小盾,等. 新型装配式钢框架结构建筑体系研究与应用[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(10): 26-31, 43.
- [2] 清华大学土木工程结构专家组,西南交通大学土木工程结构专家组,北京交通大学土木工程结构专家组,等. 汶川地震建筑震害分析[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 1-9.
- [3] BIONDINI F, LAGO B D, TONIOLO G. Role of wall panel connections on the seismic performance of precast structures[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2013, 11(4): 1061-1081.
- [4] 过勇,王静峰,沈奇罕,等. 内嵌预制 SVMFC 夹芯复合墙板-钢框架结构抗震试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2018, 41(12): 1659-1666.
- [5] 王伟,陈越时,陈以一,等. 外挂 PC 复合墙板的分层装配支撑钢框架足尺振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 88-97.
- [6] 王如伟,曹万林,殷飞. 复合墙嵌入深度对装配式轻钢框架-复合墙结构抗震性能的影响[J]. 建筑结构, 2021, 51(5): 54-60.
- [7] 种迅,侯林兵,解琳琳,等. 含减震外挂墙板的装配式框架结构协同抗震性能研究[J]. 工程力学, 2021, 38(6): 209-217.
- [8] ZHANG C, LING B, HUANG W, et al. Cyclic behavior of semi-rigid steel frame infilled with damping wall panels[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 51: 104238.
- [9] MOHEBKHAH A, TASNIMI A A, MOGHADAM H A. Nonlinear analysis of masonry-infilled steel frames with openings using discrete element method[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(12): 1463-1472.
- [10] 宋慧慧,王静峰,丁兆东,等. 内嵌预制 SVMFC 夹芯复合墙板-钢框架结构数值分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(11): 1538-1543.
- [11] ZHANG C, HUANG W, WANG H, et al. Experimental and numerical study on seismic performance of semi-rigid steel frame infilled with prefabricated damping wall panels[J]. Engineering Structures, 2021, 246: 113056.
- [12] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验规程: JGJ/T 101—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 10-18.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范(2016 年版): GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 44-47.
- [14] 孙艳文,连鸣,苏明周,等. 装配式交错桁架上弦与柱连接节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(7): 39-44.

(责任编辑 胡亚敏)