

谢军,赵国帆,黄久鹏,等.半柔性填充对装配式连接挤塑板填充墙-框架抗震性能的影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(1):17-24.
XIE Jun,ZHAO Guofan,HUANG Jiupeng,et al.Influence of semi-flexible packing on seismic performance of prefabricated infilled wall-frame[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2025,44(1):17-24.

半柔性填充对装配式连接挤塑板填充墙-框架 抗震性能的影响

谢军^{1,2}, 赵国帆¹, 黄久鹏¹, 王小东¹, 贾吉龙¹

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000;
2. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000)

摘要: 为改善预制挤塑板夹心填充墙与钢筋混凝土框架间的相互作用, 开展了缩尺比为1:2的柔性、半柔性填充摩擦耗能装配式连接填充墙框架和纯框架的低周反复加载试验, 分析了预制挤塑板夹心填充墙在新型装配式连接节点下不同填充方式对框架破坏形态、滞回特性、变形等抗震性能的影响。研究表明: 预制墙-框架间采用半柔性或柔性填充装配式连接与空框架相比, 抗震性能有所提升; 预制墙-框架间采用半柔性或柔性填充装配式连接相比, 在延性、承载力退化方面相差无几, 而在框架裂缝开展、刚度、承载力等方面前者表现得更加优越。因此在预制挤塑板夹心填充墙框架间应采用半柔性填充装配式连接构造方式。

关键词: 半柔性填充; 摩擦耗能装配式连接; 低周反复; 挤塑板夹心填充墙; 抗震性能

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)01-0017-08

Influence of semi-flexible packing on seismic performance of prefabricated infilled wall-frame

XIE Jun^{1,2}, ZHAO Guofan¹, HUANG Jiupeng¹, WANG Xiaodong¹, JIA Jilong¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China;
2. Hebei Key Laboratory of Diagnosis, Reconstruction and Anti-Disaster of Civil Engineering, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: In order to improve the interaction between prefabricated extruded panel sandwich infill walls and reinforced concrete frames, low circumferential repeated loading tests of flexible and semi-flexible infill friction energy-consuming assembled connection infill wall frames with a scaling ratio of 1:2 and pure frames were carried out, and the main study analyzed the effects of different infilling methods of the prefabricated extruded panel sandwich infill walls under the new assembled connection nodes on the seismic performance of the frames in terms of damage patterns, hysteresis characteristics, deformation, and other seismic performances. The results show that the seismic performance of prefabricated walls-frames with semi-flexible or flexible infill assembly connection is improved compared with that of empty frames, while the difference between prefabricated walls-frames with semi-flexible and flexible infill assembly connection is not much in terms of ductility and bearing capacity degradation, and the former performs much better in terms of framing crack development, stiffness, and bearing capacity. Therefore, semi-flexible infill assembly connection should be used between the frames of prefabricated extruded panel sandwich infill walls.

Key words: semiflexible filled; friction-energy-dissipated prefabricated connection; low cyclic; extruded board sandwich infilled walls; seismic performance

收稿日期: 2023-10-21 修回日期: 2024-01-04 接受日期: 2024-01-15 责任编辑: 张雯

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878242); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2022066)

作者简介: 谢军(1979-), 男, 辽宁营口人, 博士, 教授, 主要从事工程结构抗震方面的研究。E-mail: xiejun79@hebiace.edu.cn

0 引言

震灾后钢筋混凝土框架结构填充墙的破坏往往较严重,例如2019年四川长宁^[1]和甘肃夏河地震^[2]中的部分框架结构基本完好,而填充墙及连接处产生了裂缝,其破坏给正常居住带来不便,且维修费用较高。预制墙板的装配式连接因其安装方便且整体性和连接稳定性较好,近年来备受关注^[3]。

学者们对墙-框连接进行了大量的研究。熊立红等^[4]采用带滑槽的装配式连接件将墙-框连接,对框架抗侧刚度影响较小。余坤^[5]、ZHANG等^[6]针对设置砂浆滑移缝的墙板与框架装配式柔性连接进行试验,发现墙板连接处较易发生应力集中而破坏。陈晓等^[7]将框架与叠合填充墙板采用膨胀螺栓角钢连接,出现了螺栓剪断、拔出和角钢破坏的现象。PRETI等^[8]研究表明型钢连接能较大幅度提高条板填充墙框架的抗震性能,但造价相对较高。银英姿等^[9]对填充墙钢管混凝土框架进行拟静力试验,结果表明刚性连接的填充墙框架在变形和耗能能力方面表现较好,但对框架承载力的提升表现一般。WANG等^[10]对全/半灌浆套筒连接的预制RC框架-剪力墙结构进行试验研究,虽可有效提升框架的抗震性能,但施工工序较复杂。卞文军等^[11]设置了刚性、柔性、墙板与框架柱间半柔性填充3种墙-框连接方式,结果表明填充墙和框架间柔性和半柔性的连接方式抗震性能较好,但墙柱半柔性连接对柱仍有一定的顶推作用。张永兵等^[12]将橡胶作为柔性填充材料,通过试验证明此种柔性材料使框架拥有更好的变形能力,但对承载力和耗能能力的提升效果一般。以上研究主要分析了预制墙-框架间采用柔性、刚性填充装配式连接对框架抗震性能影响,并未考虑半柔性填充与装配式连接相互作用,也并未就半柔性填充装配式连接对框架抗震性能影响进行分析。

为研究墙体-框架半柔性填充装配式连接对框架抗震性能影响,同时为提高墙体性能,本文墙体采用自重轻、变形能力强、防火性能良好且保温层不易脱落的预制挤塑板夹心填充墙板。对挤塑板夹心墙板、装配式节点和填充构造进行设计,开展缩尺比为1:2的柔性、半柔性填充摩擦耗能装配式连接填充墙框架和空框架的低周往复加载试验,研究预制挤塑板夹心填充墙在新型装配式连接节点下填充方式对框架抗震性能的影响。

1 试验概况

1.1 摩擦耗能装配式连接节点设计

摩擦耗能装配式连接节点见图1,由带矩形口

的“L”形连接件与高弹橡胶、螺栓、钢垫片共同作用,矩形口考虑到柔性填充宽度、墙框变形及施工误差,设长为50 mm,宽为30 mm,且在拐角处进行半径为7 mm的倒角处理。该装配式连接节点在滑移前,先通过“L”形连接件、墙板及钢垫片间的摩擦力来提供承载力(螺栓预紧力提供摩擦力);滑移后,由摩擦力、柔性填充材料和墙体共同提供承载力(橡胶填充起到缓冲及提高摩擦阻力的作用);当螺栓位移超过矩形口处滑移量,变为由摩擦力和螺杆壁承压共同传力,来实现装配式连接件在小位移下的摩擦耗能和在大位移下的螺栓耗能。所用钢材均为Q235钢,“L”形连接件厚度为10 mm,钢垫片厚为8 mm,螺栓为M14的8.8级高强螺栓。

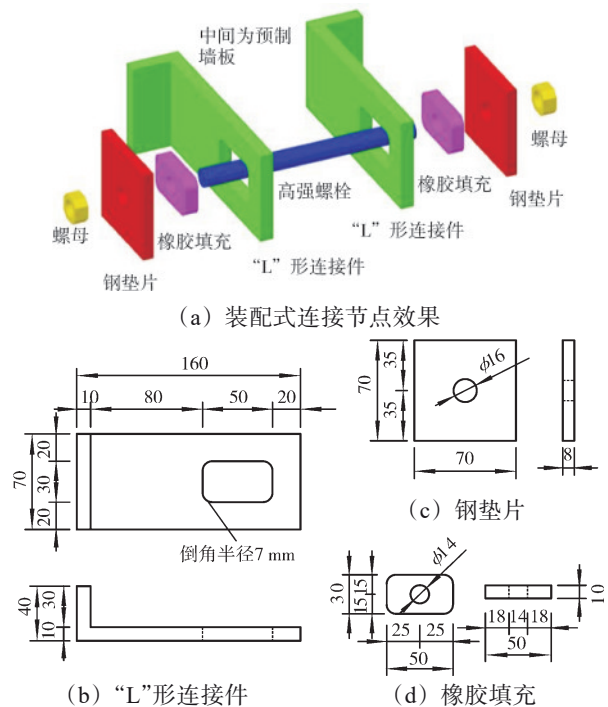


图1 装配式节点(单位:mm)

Fig.1 assembled joints (unit: mm)

1.2 预制挤塑板夹心墙板设计

预制挤塑板夹心墙板尺寸及构造见图2。预制墙板厚为100 mm。沿板边140 mm内不填充挤塑板,用于布置预埋件,以保证墙板连接处的强度;板中部及上下边沿竖向分别设置30 mm和40 mm宽的钢筋混凝土作为预制墙板的主骨架,以提高墙板的变形能力。混凝土面层厚为35 mm,中间布置30 mm厚的挤塑板^[7,12-14]。挤塑板表面布置钢丝网用于抗裂。

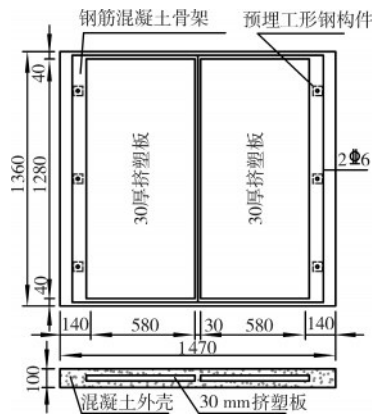


图2 墙板尺寸(单位:mm)

Fig.2 wall panel size (unit: mm)

1.3 试件设计与材料性能

为研究新型装配式连接预制挤塑板夹心墙板框架拟静力试验下的抗震性能, 采用柔性填充和半柔性填充两种填充方式, 设计了1:2缩尺的3个单层单跨的钢筋混凝土框架试件。墙框间柔性填充是指挤塑泡沫板填充在墙框预留接缝, 而半柔性填充是指在墙梁及墙柱连接的四角150 mm范围内填充挤塑泡沫板, 余处均采用坐浆法连接(接缝宽均为10 mm)^[11]。试件设计见表1。空框架尺寸及配筋见图3, 试件K2和K3示意图见图4。

表 1 试件设计

Tab.1 design of specimens

试件编号	填充墙类型	填充墙与梁、柱填充构造	装配式连接
K1	空框架	无	无
K2	预制挤塑板夹心墙板	柔性填充: 墙板与两侧框架柱及顶梁的预留接缝(宽为20 mm)填充高弹橡胶; 与地梁采用坐浆连接	装配式连接件在填充墙板双侧布置, “L”形连接件与柱预埋钢板焊接, 将高弹橡胶填充到矩形口中, 通过螺栓和钢垫片与墙连接, 在墙柱连接处沿竖向间隔470 mm设3个连接位置 ^[15]
K3	预制挤塑板夹心墙板	半柔性填充: 墙板与两侧框架柱及顶梁两角部150 mm范围内的预留接缝(宽为20 mm)填充高弹橡胶, 与顶梁接缝中间部分填充C40灌浆料; 墙板与地梁坐浆连接	

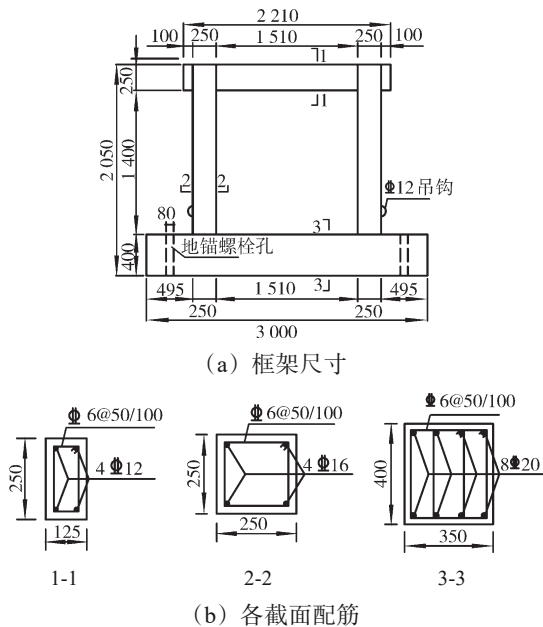
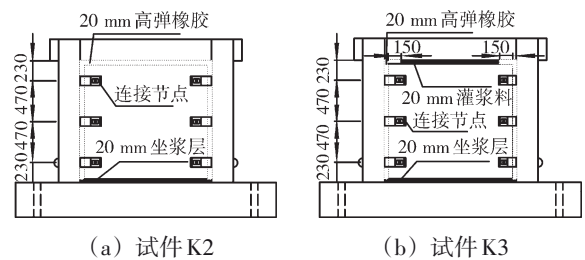


图3 空框架尺寸及配筋(单位:mm)

Fig.3 empty frame size and reinforcement (unit: mm)

所选用钢筋均为HRB400, 钢材均为Q235, 钢筋和钢材拉伸试验结果见表2。框架为C35混凝土, 实测混凝土立方体抗压强度为39.04 MPa。墙板为C25细石混凝土, 抗压强度为27.2 MPa。灌浆料强度等级为C40, 实测其抗压强度为44.3 MPa。

高弹橡胶邵尔硬度为HA70, 弹性模量为2.2 MPa, 挤塑板抗压强度为0.22 MPa, 密度为30.8 kg/m³。



(a) 试件K2 (b) 试件K3

图4 试件K2、K3示意(单位:mm)

Fig.4 specimen K2, K3 schematic (unit: mm)

表 2 材料性能

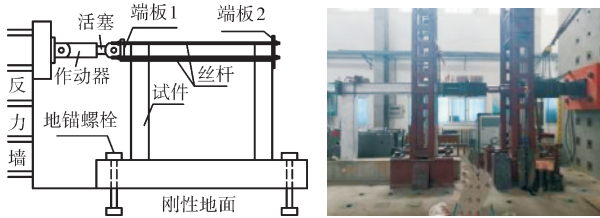
Tab.2 characteristic of materials

材料类别	直径或厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/(10 ⁵ ·MPa)
钢筋	6	406.5	512.3	2.0
	12	413.4	588.6	2.0
	16	469.8	651.6	2.0
钢板	10	269.0	391.0	2.0
	8	255.0	378.0	2.0

1.4 加载装置与加载制度

加载设备为1 000 kN电液伺服作动器, 量程

为0~500 mm。只施加水平力^[11,13]，不施加竖向载荷。试件通过两根直径为60 mm的地锚螺栓将地梁固定在试验室刚性地面，上框架梁通过四根丝杆和两块端板与作动器相连。加载装置见图5。



(a) 加载装置示意 (b) 现场加载装置
图5 加载装置

Fig.5 loading device diagram

采用位移控制加载对试件施加低周反复载荷，在试件屈服前，以2 mm为级差进行位移加载，每级位移循环一次。在试件屈服后，以屈服位移的一半为级差进行加载，每级位移循环2次。判断屈服的标准为柱底纵筋屈服和载荷位移曲线有明显拐点。若加载过程中出现以下情况之一则停止加载：①所加载荷达不到峰值载荷的85%；②混凝土大面积剥落，框架受损严重；③框架有明显面外失稳的趋势；④连接部位发生明显破坏，无法继续使用。

1.5 量测方案

位移计和应变片布置见图6。

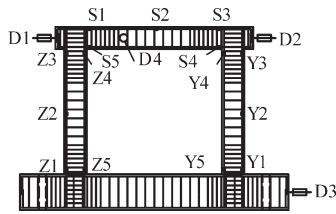


图6 应变片和位移计布置

Fig.6 strain gauge and displacement meter arrangement

布置位移计D1~D4，分别测量框架加载负向位移、正向位移、地梁滑移、面外位移，以便后期对作动器提供的位移数据进行修正和对框架面外倾倒进行监控。Z1~Z5和Y1~Y5分别为左柱、右柱纵筋应变测点，S1~S5为顶梁纵筋应变测点。通过应力应变测试分析系统对位移和应变进行实时采集。每级加载完成后仔细观察试件，描绘开裂裂缝和标注加载级数，以便后期分析试件破坏情况。

2 主要试验现象及对比分析

2.1 三榀试件的主要试验现象

试件裂缝开展及极限破坏见图7、图8。观察图7 (a)、图8 (a)，试件K1位移为4 mm时，框架柱上部出现首条横向裂缝；位移为8 mm时，既有裂缝延伸，梁柱均有新增裂缝；位移为16 mm时，右柱外侧纵筋屈服，节点核心区出现斜向裂缝，柱身新增多条横向裂缝；位移为24 mm时，载荷达到峰值为83 kN，梁柱及节点区新增裂缝较多，部分既有裂缝变宽；位移为40 mm时，梁柱节点破坏严重，大量既有裂缝变宽延长，梁底部分混凝土掉落，载荷下降至峰值的85%，试件停止加载。



(a) 试件K1



(b) 试件K2



(c) 试件K3

图7 各试件梁、柱及节点核心区域的裂缝开展

Fig.7 crack development of each specimen

观察图7 (b)、图8 (b)，试件K2位移为4 mm时，左梁柱节点出现细裂缝，墙板角部坐浆层出现轻微裂缝；位移为8 mm时，梁柱节点和柱身均有新增裂缝，部分既有裂缝延伸；位移为10 mm时，右柱外侧纵筋屈服，框架柱下部均有新增裂缝，坐浆层裂缝变宽，上部连接件滑动5 mm；位移为45 mm时，载荷达到峰值117.03 kN，梁柱及节点处既有裂缝延伸或变宽，节点区新增多条斜裂缝，混凝土挤压鼓起，连接件发出异响；位

移为 55 mm 时, 梁柱节点部分混凝土压碎掉落, 大量既有裂缝变宽延长, 框架梁竖向裂缝延伸成

贯通裂缝, 连接处持续发出异响, 此时载荷降至峰值的 85%, 停止加载。

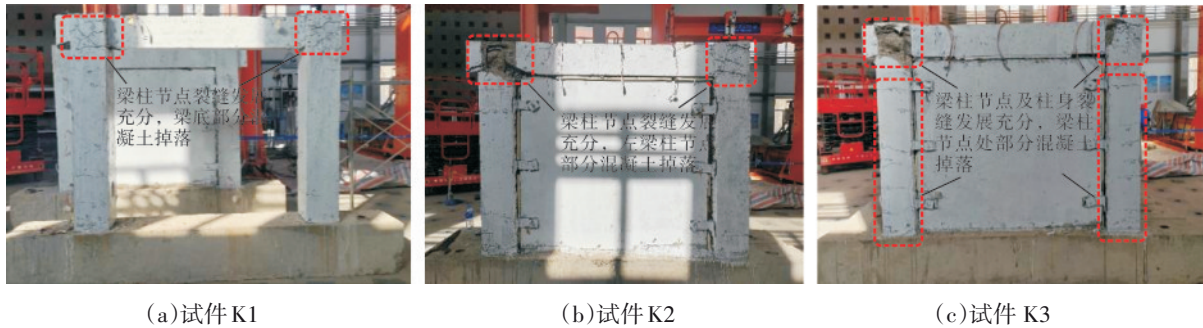


图 8 各试件极限破坏状态

Fig.8 limit failure state of each specimen

观察图 7 (c)、图 8 (c), 试件 K3 位移为 4 mm 时, 左柱底部出现首条横向裂缝, 墙板与顶梁灌浆料连接处出现轻微开裂, 上部连接件滑移 2 mm; 位移为 8 mm 时, 梁柱节点及柱下部新增裂缝, 梁底灌浆料填充处裂缝延伸, 坐浆层处出现裂缝; 位移为 16 mm 时, 右柱外侧纵筋屈服, 既有裂缝持续变宽, 梁端及梁柱节点区新增横向裂缝, 上部连接件滑移 6 mm; 位移为 48 mm 时, 载荷达到峰值 153.36 kN, 灌浆料和坐浆层均有混凝土压碎掉落, 梁端、柱身新增裂缝与既有裂缝交汇, 部分既有裂缝变宽延长, 连接件发出异响, 墙框两侧间隙变化明显, 此时连接件滑移 9 mm; 位移为 56 mm 时, 大量既有裂缝变宽延伸, 梁端及节点部分混凝土压碎掉落, 载荷降至峰值的 85%, 试件停止加载。

件 K1、K2 的开裂现象集中在框架柱的顶部、底部和节点区域, 试件 K3 破坏时, 梁柱节点破坏也较重, 但柱身裂缝分布较均匀, 说明半柔性装配式连接改善了框架的受力状态。

试件 K2 三面柔性填充使得墙-框间相互作用较弱, 装配式连接件成为墙-框间主要传力装置, 使得一侧框架柱预埋钢板的焊接钢筋有被拉断的现象; 试件 K3 由于墙-梁有部分灌浆料填充, 墙板不只是通过装配式连接节点和橡胶填充来进行框架的传力, 墙-框相互作用效果更强。最终装配式连接件基本完好, 螺栓连接处有明显磨损, 达到了较好的摩擦耗能效果; 墙-梁连接部位灌浆料压碎严重, 坐浆层裂缝宽度小于试件 K2; 两者填充墙均可正常使用, 框架破坏较严重, 墙板螺栓连接处未出现应力集中现象, 达到了预期效果。

2.2 三榀试件的试验现象对比分析

分析试件 K1 (纯框架)、K2 (柔性填充装配式连接填充墙框架试件)、K3 (半柔性填充装配式连接填充墙框架试件) 的试验现象可以发现, 试

3 试验结果分析

3.1 滞回特性

各试件的滞回曲线见图 9。

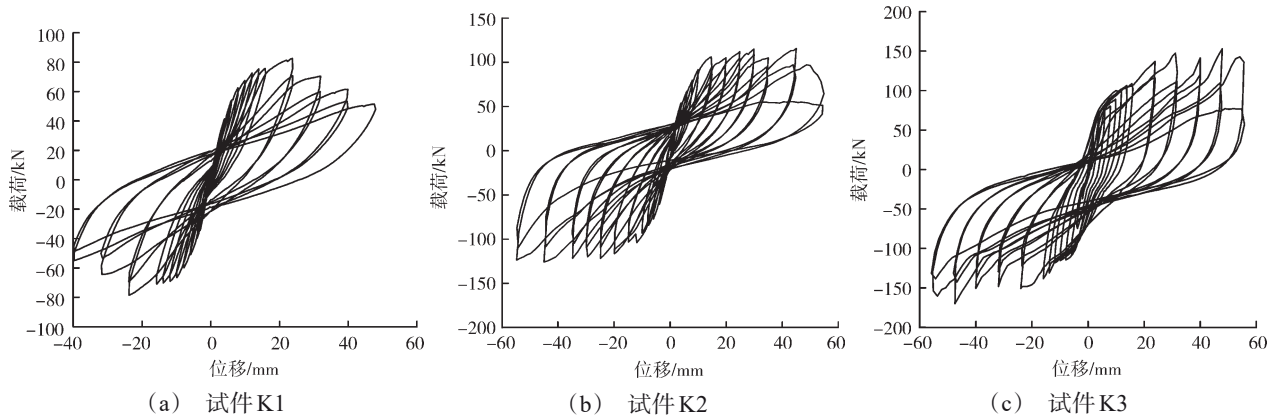


图 9 滞回曲线

Fig.9 hysteresis curve

由图 9 可以看出, 3 个试件在破坏前均经历了弹性和塑性阶段, 在弹性阶段试件 K1、试件 K2 卸载后残余变形较小, 而试件 K3 残余变形较大。

试件 K1 滞回曲线呈梭形, 试件 K2 呈反“S”形, 试件 K3 由“弓”形变为“Z”形。对比 3 个试件卸载时的滞回曲线, 可以发现试件 K2、试件 K3 均有滑移段, 其中试件 K3 的滑移段更长。

试件 K2、试件 K3 在达到峰值载荷前滞回环最大, 通过分析试验现象发现有两个原因, 一是墙

板与框架完全紧贴, 二是装配式连接节点由小位移下的摩擦耗能转变为大位移下的摩擦力和螺杆壁承压共同传力。

3.2 骨架曲线及特征载荷

各试件特征点的试验结果见表 3, 其中屈服点通过 R.Park 法确定, 极限载荷 P_u 为峰值载荷后随着位移增加载荷下降至峰值载荷的 85% 时所对应的载荷。将各试件滞回曲线上各级加载的最大载荷点依次相连得到骨架曲线, 见图 10。

表 3 特征载荷

Tab.3 characteristic load

试件	加载方向	屈服点		峰值点		极值点		初始刚度 (kN·mm ⁻¹)	延性系数
		屈服载荷 /kN	屈服位移 /mm	峰值载荷 /kN	峰值位移 /mm	极限载荷 /kN	极限位移 /mm		
K1	正向	75.15	12.54	83.30	24	70.55	32.78	12.42	2.57
	负向	-67.45	-12.11	-77.41	-24	-65.79	-31.95		
K2	正向	102.65	14.34	117.03	45	99.47	48.64	15.05	3.38
	负向	-106.16	-13.34	-125.63	-45	-106.78			
K3	正向	114.54	17.24	153.36	48	130.35	56.00	24.89	3.13
	负向	-138.08	-16.32	-165.83	-48	-140.95	-56.00		

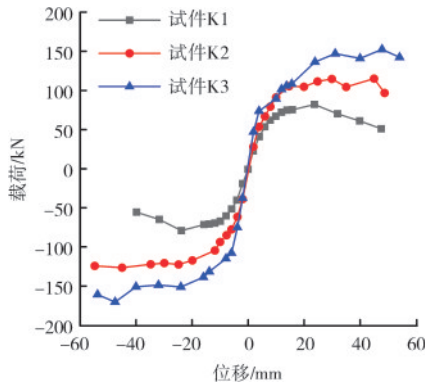


图 10 骨架曲线

Fig.10 skeleton curve

由表 3 和图 10 可以看出, 各试件的骨架曲线变化趋势基本一致, 均经历了弹性、弹塑性、塑性和破坏阶段。试件 K3 的骨架曲线在 4 个阶段均高于试件 K2, 且两者极限位移基本相同, 说明试件 K3 的连接构造在提升框架承载力的同时, 并未对框架的抗震性能造成不利影响。

试件 K1、K2、K3 的屈服位移比和载荷比分别为 1 : 1.14 : 1.37 和 1 : 1.37 : 1.52, 试件 K3 的屈服位移和载荷比试件 K2 分别提高了 20% 和 12%; 试件 K1、K2、K3 的峰值载荷之比及所处位移之比分别为 1 : 1.40 : 1.84 和 1 : 1.88 : 2, 试件 K3 的峰值位移和载荷比试件 K2 分别提高了 6.7% 和 31%; 试件 K1、K2、K3 的极限载荷之比及所处位移之比分

别为 1 : 1.41 : 1.85 和 1 : 1.48 : 1.71, 试件 K3 的极限位移和载荷比试件 K2 分别提高了 15% 和 31%。柔性和半柔性填充装配式连接的填充墙框架比空框架在各方面均有所提升, 其中填充方式为半柔性的试件 K3 的提升幅度较大, 说明它能使结构具有更高的承载力和更好的抗震性能。

3.3 延性

结构的延性指结构在承受载荷时能够发生较大的变形而不失去稳定性的特性。位移延性系数用于描述结构在地震载荷下的变形能力和延性。位移延性系数为结构的最大位移与屈服位移之比, 即 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$, 各试件的位移延性系数见表 3。

试件 K1、K2、K3 的延性系数之比为 1 : 1.32 : 1.22。表明试件 K2、K3 的延性均比空框架好, 说明柔性和半柔性填充装配式连接的填充墙改善了框架变形能力, 所设计的分阶段耗能的装配式连接节点起到了关键作用。试件 K2 比试件 K3 的延性提高 8.0%, 说明试件 K3 墙-梁半柔性填充处的灌浆料对框架变形的影响不大。

3.4 刚度退化

割线刚度 K_i 指的是骨架曲线各级加载点正负向连线的斜率, 可表示为

$$K_i = (|+F_i| + |-F_i|) / (|+\Delta_i| + |-\Delta_i|),$$

式中: $+F_i$ 、 $-F_i$ 分别为第 i 级循环正、负向最大水平载荷; $+\Delta_i$ 、 $-\Delta_i$ 分别为第 i 级循环正、负向最大水平载荷对应的位移。

通过割线刚度可得到结构的刚度退化曲线, 该曲线反映了结构在载荷逐渐增大过程中刚度下降情况。各试件刚度退化曲线见图 11。

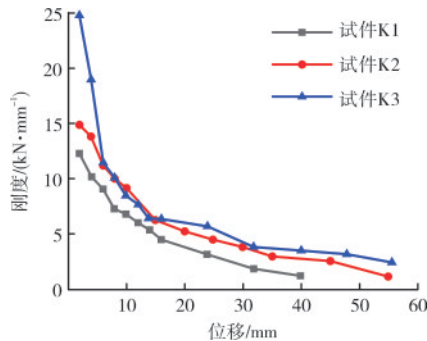


图 11 刚度退化曲线

Fig.11 stiffness degradation curve

由图 11 可以看出, 与试件 K2 相比, 试件 K3 由于墙-梁有部分半柔性填充构造, 使得其对结构的前期刚度提升更大。试件 K1、K2、K3 的初始刚度比为 1 : 1.21 : 2, 前期刚度退化速率大小排序为 $K3 > K2 > K1$, 前期随着位移的增加, 试件 K3 的墙-梁间灌浆料连接处开裂, 导致其刚度退化较快。

试件屈服后, 随着位移的增加, 试件 K3 的墙-梁半柔性填充使得墙-框相互作用更强, 导致试件 K3 刚度退化的速率比试件 K2 小; 随着位移的增加, 高弹橡胶作用变小, 墙-框间缝隙变大, 使试件 K1、K2 刚度退化速率相近。

加载后期, 试件 K2 框架节点处破坏严重, 无法继续承载, 最终刚度与试件 K1 接近; 试件 K3 的最终刚度明显比试件 K1、K2 大, 说明后期半柔性装配式连接的墙板对框架仍有一定刚度贡献。

3.5 承载力退化

承载力退化曲线描述了结构在同级加载时, 承载力随着循环加载次数的增加而逐渐降低的趋势。承载力退化系数越小, 说明试件承载力退化越严重。承载力退化系数为

$$\lambda_i = P_{i,j} / P_{i,j-1},$$

式中: $P_{i,j}$ 为第 i 级加载时, 第 j 次循环最大载荷; $P_{i,j-1}$ 为第 i 级加载时, 第 $j-1$ 次循环最大载荷。

各试件承载力退化曲线见图 12。由图 12 可知, 试件 K1 承载力退化较为稳定, 试件 K2 的退化系数最大, 说明在高弹橡胶柔性填充和新型装配式节点连接下的墙框结构稳定性较好。3 个试件在位移

小于 40 mm 时, 退化系数大小排序为 $K2 > K3 > K1$, 说明在加载前期, 通过装配式连接的预制填充墙板减缓了结构的承载力退化。

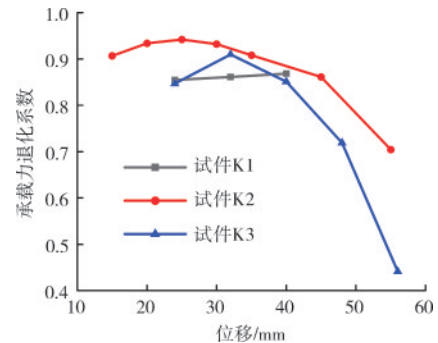


图 12 承载力退化曲线

Fig.12 bearing capacity degradation curve

加载后期, 试件 K3 的承载力退化比 K2 快, 这说明 K3 的墙-梁连接处的半柔性填充, 给框架的顶推作用更强, 使得框架承载力下降速率逐渐变快, 直至结构破坏。

3.6 耗能能力

结构的耗能能力是指结构在承受载荷作用时, 吸收和分散载荷能量的能力。耗能能力通常用结构的累计耗能来评定。累计耗能是指结构在经历多次地震循环载荷后所吸收和分散的总能量, 本试验中以滞回环的面积来代替累计耗能量。各试件的累计耗能曲线见图 13。

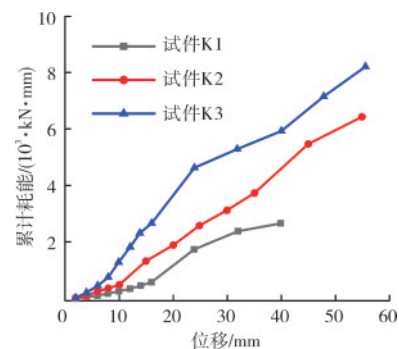


图 13 各试件累计耗能

Fig.13 cumulative energy consumption of each specimen

由图 13 可知, 试件 K2、试件 K3 的耗能能力均比试件 K1 强。试件 K2 初期累计耗能比试件 K1 提升较少, 因为试件 K2 前期仅靠高弹橡胶压缩和连接件摩擦来耗能。试件 K3 初期累计耗能提升较大, 因为试件 K3 前期依靠墙梁灌浆料黏结、高弹橡胶压缩和连接件摩擦共同耗能。后期试件 K2、K3 累计耗能越来越大, 因为此时连接件由摩擦耗能变为摩擦力和螺杆壁共同承载, 实现了连接节

点分阶段耗能。位移为24 mm时,试件K1、K2、K3累计耗能之比为1:1.42:2.61,可见试件K3连接方式对结构耗能能力的影响显著。

4 结论

根据试件K1(空框架)、试件K2(柔性填充摩擦耗能装配式连接填充墙框架)和试件K3(半柔性填充摩擦耗能装配式连接填充墙框架)的拟静力试验,对其承载、变形、耗能等方面的抗震性能进行分析,得出如下结论。

(1) 填充墙-顶梁间半柔性填充改善了框架的受力,使得试件K3破坏时柱身裂缝分布较均匀;而装配式连接节点基本完好,螺栓连接处磨损明显且未出现应力集中现象,摩擦耗能效果显著。

(2) 试件K2、K3在延性、承载力退化方面相差不大,但与试件K1相比均有提升,说明基于柔性和半柔性填充装配式连接的填充墙框架均改善了框架的变形能力,所设计具备分阶段耗能的装配式连接节点发挥了关键作用。

(3) 试件K2、K3均提高了框架的刚度、承载力、耗能能力,试件K3在初始刚度、峰值承载力及增幅较大时(位移为24 mm)的累计耗能方面与试件K2相比,分别提升约65%、31%和84%,说明半柔性填充构造的抗震性能优于柔性填充构造。

参考文献(References):

- [1] 李波,郭恩栋,毛晨曦.四川长宁县6.0级地震通信系统结构震害调查与分析[J].世界地震工程,2020,36(2):172-179.
LI Bo, GUO Endong, MAO Chenxi. Seismic damage survey and analysis of communication system in Changning M_s 6.0 earthquake [J]. World Earthquake Engineering, 2020, 36(2): 172-179.
- [2] 马小平,孙艳萍,陈文凯,等.甘肃夏河 M_s 5.7地震震度评定及震害特征分析[J].地震工程学报,2020,42(3):777-783.
MA Xiaoping, SUN Yanping, CHEN Wenkai, et al. Seismic intensity evaluation and damage characteristics of Xiahe, Gansu M_s 5.7 earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(3): 777-783.
- [3] 鲁余勇,冯云,杨国梁,等.全装配式混凝土框架综述[J].工程抗震与加固改造,2020,42(6):96-105,150.
LU Yuyong, FENG Yun, YANG Guoliang, et al. Summary of wholly precast concrete frame [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42(6): 96-105, 150.
- [4] 熊立红,罗明康,陈国武,等.BFG增强蒸压加气混凝土砌块填充墙框架抗震性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2018,38(3):134-141.
XIONG Lihong, LUO Mingkang, CHEN Guowu, et al. Experimental study on seismic performance of BFG autoclaved aerated concrete block infilled frame [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2018, 38(3): 134-141.
- [5] 余坤.预制装配式混凝土框架减震墙板结构抗震性能研究[D].广州:广州大学,2018:11-80.
- [6] ZHANG C, YU T H, CHEN Z Y, et al. Seismic behavior of novel low-damage precast infill walls with sliding joints for reinforced concrete frame [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2022, 51(15): 3730-3754.
- [7] 陈晓,王曙光,刘伟庆.柔性连接叠合填充墙板-框架结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(12):37-43.
CHEN Xiao, WANG Shuguang, LIU Weiqing. Experimental study on seismic behaviors of composite filling wall-frame structures with flexible connection [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(12): 37-43.
- [8] PRETI M, BOLIS V. Masonry infill construction and retrofit technique for the infill-frame interaction mitigation: test results [J]. Engineering Structures, 2017, 132: 597-608.
- [9] 银英姿,李斌.有无填充墙钢管混凝土框架抗震性能对比研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(4):537-540.
YIN Yingzi, LI Bin. Comparative study on seismic behavior of concrete filled RHS frame with or without infill wall [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2011, 30(4): 537-540.
- [10] WANG W, MA J W, WANG X X. Seismic behavior of a precast RC frame-shear wall structure using full/half grout sleeve connections [J]. Engineering Structures, 2023, 280: 115685.
- [11] 卞文军,范力,李升旗.不同连接方式预制复合墙板填充墙对框架抗震性能的影响[J].建筑结构学报,2020,41(增刊1):196-203.
BIAN Wenjun, FAN Li, LI Shengqi. Influence of prefabricated composite infilled wallboard with different connection modes on seismic behavior of frame structure [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Suppl.1): 196-203.
- [12] 张永兵,郭新华,李勇,等.柔性连接填充墙RC框架结构抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2022,43(6):187-195.
ZHANG Yongbing, GUO Xinhua, LI Yong, et al. Experimental study on seismic performance of masonry-infilled RC frame building with flexible connection [J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(6): 187-195.
- [13] 程元鹏.装配式砼框架填充墙结构体系及其受力性能研究[D].张家口:河北建筑工程学院,2020:11-43.
- [14] 麻建锁,郭腾,白润山.装配式钢框架填充墙结构体系抗震性能试验研究[J].工程抗震与加固改造,2022,44(3):72-78,71.
MA Jiansuo, GUO Teng, BAI Runshan. Experimental study on seismic behavior of fabricated steel frame infilled wall structure system [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2022, 44(3): 72-78, 71.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.砌体结构设计规范:GB 50003—2011[S].北京:中国计划出版社,2012:43-44.