

引用本文:杨艳敏,胡挺益,张滨麟,等. 基于钢板连接的夹芯墙板-钢框架装配式体系抗震性能[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(3):63-72.
YANG Yan-min, HU Ting-yi, ZHANG Bin-lin, et al. Seismic Performance of Sandwich Wallboard-steel Frame Assembly System Based on Steel Plate Connection[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 63-72.

DOI:10.19815/j.jace.2019.04075

基于钢板连接的夹芯墙板-钢框架装配式体系 抗震性能

杨艳敏¹, 胡挺益¹, 张滨麟¹, 王 勃¹, 王小玉²

(1. 吉林建筑大学 土木工程学院, 吉林 长春 130118;

2. 河南城建学院 土木与交通工程学院, 河南 平顶山 467036)

摘要:为了研究基于钢板连接的夹芯墙板-钢框架体系的抗震性能,首先对钢板连接下的夹芯墙板与钢框架进行了抗剪性能试验,研究了连接钢板的抗剪性能,然后进行了 1 榀连接钢板厚度为 3 mm 夹芯墙板钢框架体系、1 榀连接钢板厚度为 6 mm 夹芯墙板钢框架体系和 1 榀对比空框架体系的低周往复试验,分析了各试件的失效模式、滞回性能、耗能能力以及刚度退化规律等,最后综合评价其抗震性能。结果表明:连接钢板的平均抗剪承载力为 59.8 kN,并且连接钢板的焊接质量会影响其受力性能,造成墙板框架体系正负向极限承载力的不对称,最大相差达到 25.1%;当连接钢板较薄时,连接件撕裂与开焊,除连接件附近混凝土开裂外,墙板基本完好;当连接钢板较厚时,连接件基本完好,墙板斜对角开裂破坏,加厚钢板虽能提高体系的初始刚度,但延性有所降低;增设墙板能提高主体框架的承载力、延性与耗能能力等,并且墙板与钢框架之间协调变形,表现出良好的整体性;当水平位移较大时,墙板与框架形成对角斜撑机制;研究成果可为后续开展夹芯墙板与框架相互作用机理的研究提供理论指导。

关键词:钢板连接;钢框架;夹芯墙板;抗震性能;抗剪承载力;拟静力试验

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)03-0063-10

Seismic Performance of Sandwich Wallboard-steel Frame Assembly System Based on Steel Plate Connection

YANG Yan-min¹, HU Ting-yi¹, ZHANG Bin-lin¹, WANG Bo¹, WANG Xiao-yu²

(1. School of Civil Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, Jilin, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, Henan, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of sandwich wallboard-steel frame system based on steel plate connection, the shear performance test of sandwich wallboard and steel frame under steel plate connection was carried out, and the shear performance of the steel plate connection was studied. Then, one steel frame system of sandwich wallboard with thickness of 3 mm, one steel frame system of sandwich wallboard with thickness of 6 mm and one contrastive empty framework system were studied by low cycle reciprocating test. The failure mode,

收稿日期: 2019-07-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0806100); 国家应急管理部安全事故防治科技项目(jilin-0001-2018AQ);

吉林省教育厅“十三五”科学技术研究规划项目(JJKH20190872KJ)

作者简介: 杨艳敏(1969-),女,吉林长春人,教授, E-mail: 282872984@qq.com。

hysteretic performance, energy dissipation capacity and stiffness degradation of each specimen were analyzed. Finally, the seismic performance was evaluated comprehensively. The results show that the average shear capacity of the connecting steel plate is 59.8 kN, and the welding quality of the connecting steel plate will affect its mechanical performance, which will cause the asymmetry of the positive and negative ultimate bearing capacity of the wallboard frame system, with the maximum difference of 25.1%. When the connecting steel plate is thin, the connecting parts are torn and welded, except for the concrete cracking near the connecting parts, the wallboard is basically in good condition. When the connecting steel plate is thick, the connecting parts are basically intact and the wall plate cracks diagonally. In addition, the thickening steel plate can improve the initial stiffness of the system, but the ductility is reduced. Adding wallboard can improve the bearing capacity, ductility and energy dissipation capacity of the main frame. And the coordinated deformation between wallboard and steel frame shows a good integrity. When the horizontal displacement is large, the diagonal oblique brace mechanism is formed between the wallboard and the frame, which can provide theoretical guidance for the subsequent research of the interaction mechanism between the sandwich wallboard and the frame.

Key words: steel plate connection; steel frame; sandwich wallboard; seismic performance; shear capacity; pseudo-static test

0 引言

装配式建筑是将建筑各组成部件进行工业化预制的结构模式,打破了传统现场湿作业的建造方式,具有造价成本低、工期短等优势^[1-3]。装配式建筑源于欧洲,发展于日本、美国等国家,并取得众多研究成果^[4]。20世纪80年代,美国住房与城市发展部制定了系列的装配式建筑设计与施工规范标准^[5-7]。相比之下,中国的装配式建筑发展起步较晚,但近年来,装配式建筑发展迅猛,其中,装配式墙板框架体系具有轻质、经济等特点,成为了当前的研究热点^[8]。

文献[9]~[11]中指出,墙板框架体系中的外荷载大部分由主体框架承担,而实际中的墙板不仅起到了围护作用,还为主体框架提供了附加水平侧向刚度;《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2014)中指出填充墙板对结构体系承载力设计的影响,也指出了内嵌式非承重轻质墙板能提高钢框架体系20%左右的抗侧刚度。冯燕军^[12]进行了内嵌式纤维混凝土墙板钢框架结构体系的抗震性能研究,结果表明,墙板与主体框架分别为体系提供第1、2道抗震防线,从而提高体系的抗震设防水平。然而,强震下装配式墙板框架体系的破坏大部分集中于连接节点处,为此,邱增美等^[13]进行了ALC外墙板与钢梁新型连接节点试验研究,验证了该新型连接节点的传力性能稳定可靠性。刘学春等^[14]针

对墙板钢框架体系提出了U形与T形吊挂可控滑移连接节点,并进行了低周往复试验研究,结果表明,节点的合理设计对提高体系的抗震能力起到了至关重要的影响^[15],地震下的2种新型节点墙板钢框架结构体系协调性较好。

基于此,本文提出了一种新型的钢板连接夹芯墙板钢框架体系,夹芯墙板是由轻质、高强的全轻混凝土(粗骨料由页岩陶粒和页岩淘砂组成)预制而成,通过墙板中间部位填充节能高效保温泡沫板的方式,形成低“热桥”效应^[16],实现围护-保温-抗震的一体化,然后采用低周往复加载方式进行试验研究,综合评价其抗震性能,为进一步推进住宅产业化进程研究提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

设计并制作了3榀1:2缩尺钢框架体系:1榀连接钢板厚度为3 mm的夹芯墙板钢框架体系LWSF-1;1榀连接钢板厚度为6 mm的夹芯墙板钢框架体系LWSF-2;1榀对比空框架体系LWSF-3。试件LWSF-1与LWSF-2的连接件除了钢板连接厚度不同外,其余尺寸均一致。试件LWSF-1的连接件尺寸如图1所示,具体实物如图2所示。

试件LWSF-1与LWSF-2中的夹芯墙板尺寸均为1 500 mm×1 500 mm×200 mm,内外混凝土层各为50 mm,混凝土设计强度为LC20,其中夹芯

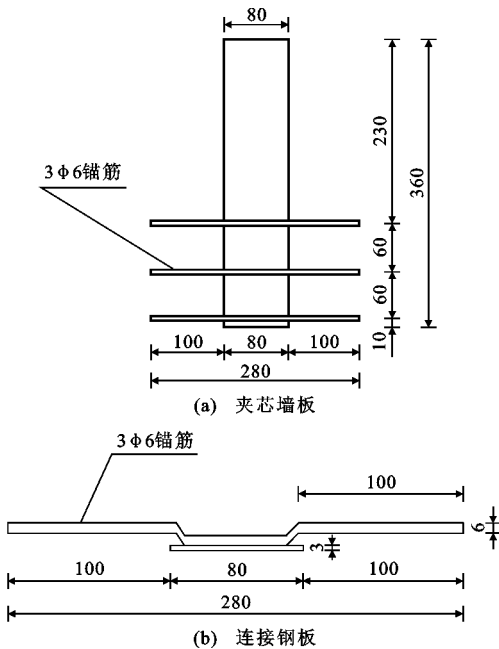


图 1 钢板连接详图 (单位:mm)

Fig. 1 Details of Steel Plate Connection (Unit:mm)

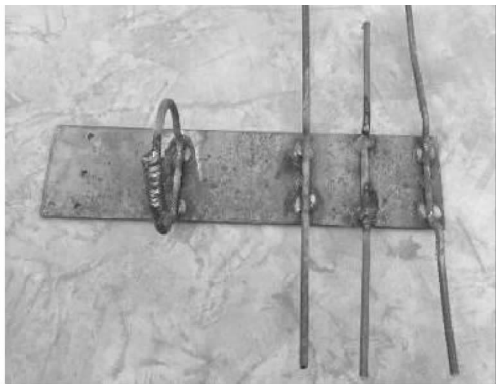


图 2 连接钢板实物

Fig. 2 Connecting Steel Plate

层的保温材料为聚乙烯泡沫,厚度为 100 mm,钢筋网架采用 $\Phi 3$ 冷拔钢丝,其构造如图 3 所示,平面如图 4 所示。各试件主体框架的尺寸均一致,如图 5 所示,框架梁采用工字钢,底梁截面尺寸为 HW250 \times 250 \times 9 \times 14,顶梁截面尺寸为 HW200 \times 200 \times 8 \times 12;框架柱采用方形钢,截面尺寸为 $\square 200\times 200\times 5$,所有钢材型号均为 Q235B。

钢板连接件的锚固过程为:首先将钢板锚筋端预埋于墙板内部的预设位置,然后墙板内嵌主体框架,最后将钢板的外伸端与框架上下梁焊接固定,安装示意图如图 6 所示。

1.2 试验方案设计

加载装置如图 7 所示。试件底部通过压梁固定,提供倾覆弯矩,防止其倾倒。由于试验过程中不

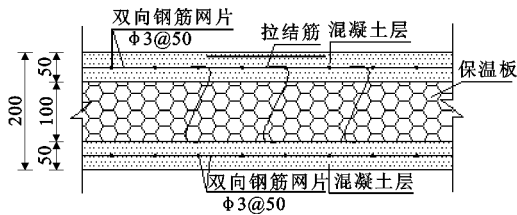


图 3 墙板构造 (单位:mm)

Fig. 3 Structure of Wallboard (Unit:mm)

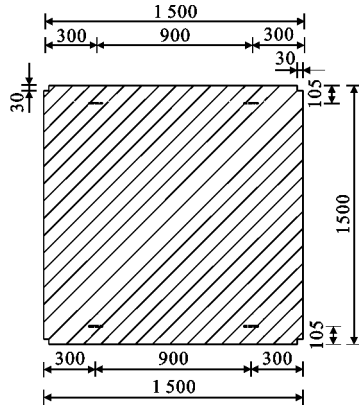


图 4 墙板平面 (单位:mm)

Fig. 4 Plane of Wallboard (Unit:mm)

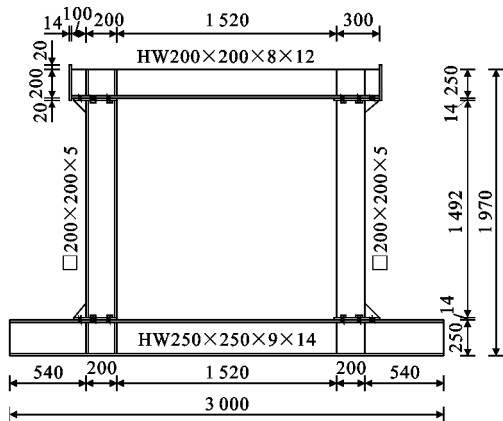


图 5 主体框架尺寸 (单位:mm)

Fig. 5 Dimension of Main Frame (Unit:mm)

考虑轴压的影响,故在梁端只施加低周往复水平荷载。水平加载装置采用美国 MTS 公司生产的电液伺服液压加载系统,最大输出力为 650 kN,输出位移量程为 -250~250 mm。

采用等幅与变幅相结合的加载制度进行试验加载,并以位移增量作为控制方式^[17],试验加载速率为 3 mm \cdot s⁻¹。试验前期的位移增量级差为 1 mm,当位移幅值为 4 mm 时级差改为 2 mm,每级位移循环 2 次,加载制度如图 8 所示。

当发生下列情况之一时,即认为试件处于极限破坏阶段^[18],应结束试验:①框架梁、柱发生严重屈

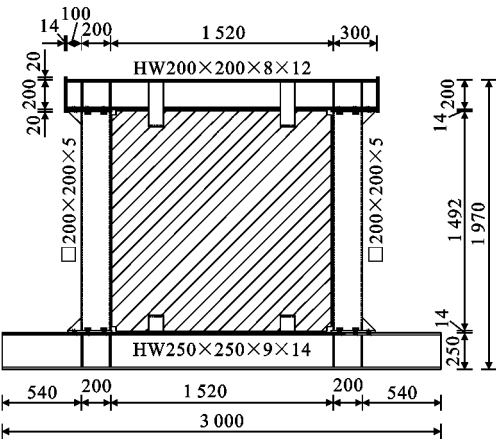


图 6 夹芯墙板-钢框架安装 (单位:mm)
Fig. 6 Installation of Sandwich Wallboard-steel Frame (Unit:mm)

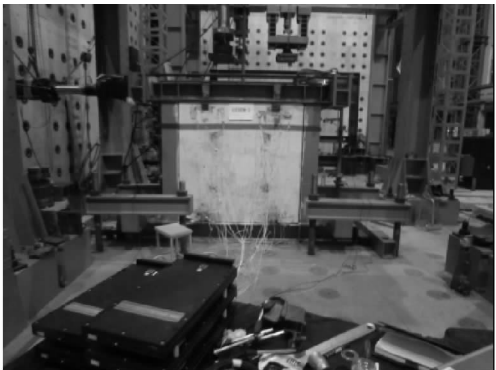


图 7 试验加载装置
Fig. 7 Test Loading Device

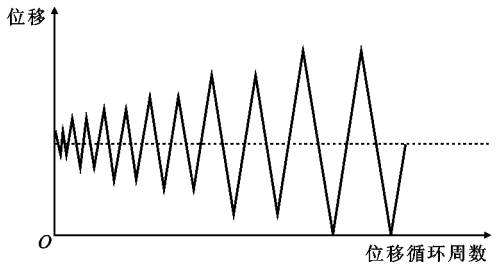


图 8 加载制度
Fig. 8 Loading System

曲;②钢板连接被剪断;③钢板连接附近混凝土破坏并脱落;④墙板角部混凝土压碎;⑤墙板发生不可逆转的破坏。

1.3 连接件抗剪试验

钢板连接件抗剪试验^[19]简图如图 9 所示,其中连接件尺寸、锚固方式、焊接方式与正式试验完全一致。共设计 3 个完全相同的试件,编号分别为 GB-1,GB-2,GB-3。连接件厚度为 3 mm,预埋于同夹芯墙板等厚度的实体全轻混凝土中,每块混凝土预埋 2 个连接件,分别与 H 型钢采用角焊缝进行焊接固

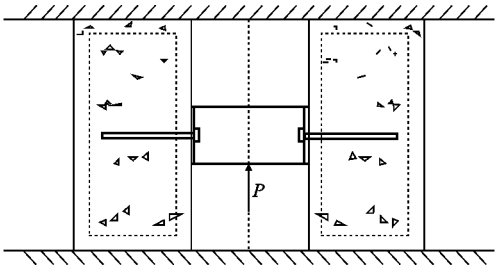


图 9 试验简图
Fig. 9 Test Sketch



图 10 试验装置
Fig. 10 Test Device

定,试验装置如图 10 所示。装置上端采用 500 kN 电液伺服试验机固定,下端采用 300 kN 拉拔仪施加反向荷载。

试件开裂荷载、破坏荷载及破坏现象如表 1 所示。由表 1 可知:各试件的抗剪承载力有着一定的差异,此差异主要由焊缝质量引起,试件 GB-2 的抗剪承载力最小,焊缝质量最差,各试件抗剪承载力平均值为 59.8 kN。

表 1 开裂荷载、破坏荷载及破坏现象

Tab. 1 Cracking Load, Failure Load and Failure Phenomenon

连接方式	试件编号	开裂荷载/kN	抗剪承载力/kN	主要破坏现象
焊接钢板连接	GB-1	54.1	64.2	全轻混凝土试块前后形成贯通的裂缝,焊缝被剪开,试件破坏。
	GB-2	45.9	46.4	连接钢板上方混凝土出现通长裂缝,焊缝被剪开,试件破坏。
	GB-3	54.1	68.7	连接钢板上方受压区混凝土出现剪切裂缝,混凝土试块前后裂缝较大。

试件主要破坏形态如图 11 所示,各试件的破坏形态均由全轻混凝土开裂破坏引起,试块顶部形成



图 11 主要破坏形态

Fig. 11 Main Failure Mode

局压破坏区域。

2 试验结果分析

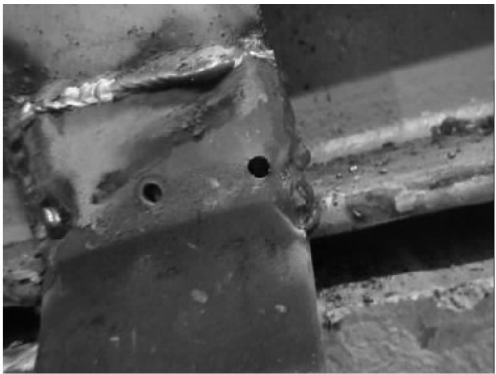
2.1 试验现象

2.1.1 试件 LWSF-1

加载初期,墙板与主体钢框架之间处于协调弹性变形阶段。当位移 Δ 为 6 mm 时,左下角连接件附近的混凝土出现多条细小裂缝。随着位移增大,底部连接件开始屈曲变形,同时墙板与框架柱内侧间发出“吱吱”声响。当位移 Δ 为 26 mm 时,左下角连接件周围出现 1 条主裂缝,并向墙板右底部发展。当位移 Δ 为 32 mm 时,左下角裂缝贯通,左上角连接件发出“吱吱”声响。当位移 Δ 为 -34 mm 时,左上角连接件焊缝根部被撕裂[图 12(a)]。当位移 Δ 为 -38 mm 时,右下角连接件的焊接处完全开焊[图 12(b)]。当位移 Δ 为 40 mm 时,左下角连接件附近的混凝土挤碎[12(c)],连接件开焊失效退出工作,试验停止,此时墙板整体损坏较小。

2.1.2 试件 LWSF-2

加载初期,墙板与主体框架处于弹性变形阶段,无明显变化。当位移 Δ 为 -6 mm 时,左上角连接件附近出现第 1 条裂缝,裂缝逐渐变宽并向墙板顶部延伸。当位移 Δ 为 -8 mm 时,左下角出现 2 条贯穿连接件的裂缝[图 13(a)]。当位移 Δ 为 10 mm 时,右下角墙板距框架柱 45 cm 处出现多条裂缝并向连接件延伸,同级反向加载过程中,右上角连接件附近出现多条微裂缝。当位移 Δ 为 12 mm 时,右上角墙板出现较宽的斜向 45° 裂缝[图 13(b)],并向顶部延伸,随着位移幅值的增大,连接件附近的裂缝增多并变宽。当位移 Δ 为 30 mm 时,连接件附近混凝土剥离[图 13(c)],墙板破坏严重,试验停止,此时连接件基本保持完整性。



(a) 左上角预埋件撕裂



(b) 右下角预埋件开焊



(c) 左下角混凝土破坏

图 12 试件 LWSF-1 主要破坏现象

Fig. 12 Main Failure Phenomena of Specimen LWSF-1

2.1.3 试件 LWSF-3

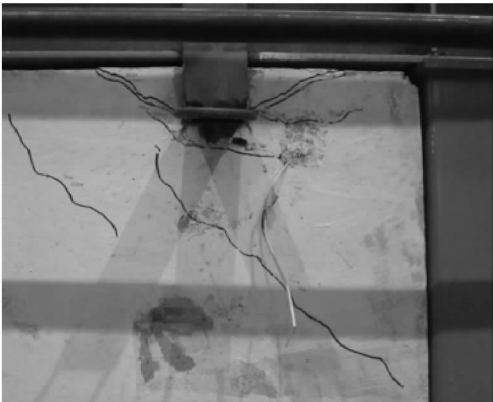
当位移 Δ 为 10 mm 时,框架柱表面出现掉漆起皮现象,此时柱底屈曲变形,试件进入塑性阶段。随着位移幅值的增大,框架柱底屈曲现象愈加明显。当位移 Δ 为 16 mm 时,左侧柱底部外侧开始屈曲变形。当位移 Δ 为 28 mm 时,左、右柱脚内侧开始屈服。当位移 Δ 为 -36 mm 时,右柱加劲肋屈曲变形[图 14(a)]。当位移 Δ 为 38 mm 时,左侧柱脚焊缝发出撕裂声响,柱底部与垫板焊接位置开焊[图 14(b)]。

2.2 滞回曲线

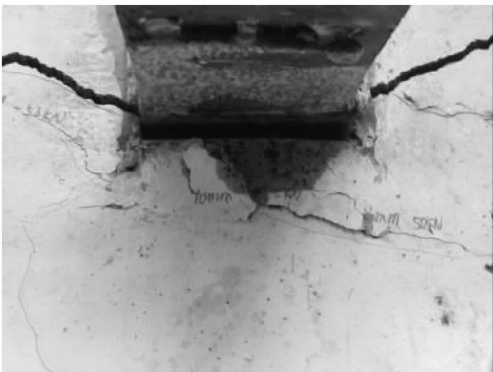
各试件的荷载-位移滞回曲线如图 15 所示。由曲线可知:加载初期,滞回环包围的面积较小,荷载-



(a) 左下角2条贯穿裂缝



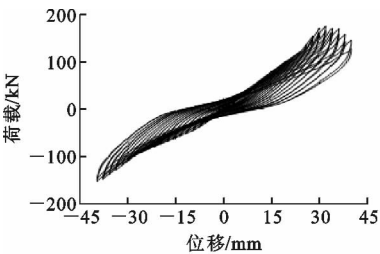
(b) 右上角45°裂缝



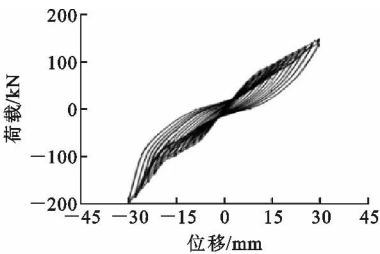
(c) 混凝土破坏剥离

图 13 试件 LWSF-2 主要破坏现象

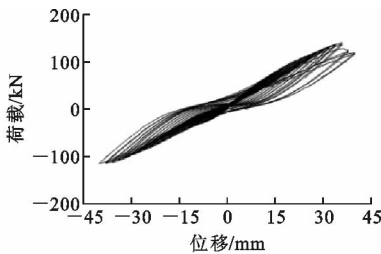
Fig. 13 Main Failure Phenomena of Specimen LWSF-2
位移基本呈线性关系,此时各试件处于弹性变形阶段;随着位移幅值的增加,滞回环包围的面积变大,



(a) 试件LWSF-1



(b) 试件LWSF-2



(c) 试件LWSF-3

图 15 荷载-位移滞回曲线

Fig. 15 Load-displacement Hysteretic Curves



(a) 外侧柱角屈曲



(b) 左侧柱脚开焊

图 14 试件 LWSF-3 主要破坏现象

Fig. 14 Main Failure Phenomena of Specimen LWSF-3

荷载-位移不再呈线性变化关系,此时试件进入塑性阶段。随着同级位移加卸次数的增加,荷载-位移曲线的斜率逐渐减小,此时各试件的残余变形累积增加,刚度明显退化。

由曲线还可看出:试件 LWSF-1 与 LWSF-2 出现不同程度的捏缩现象,主要原因在于墙板与钢框架之间的连接钢板处产生剪切滑移;此外,夹芯墙板中间的保温夹芯层不参与水平受力,一定程度上削弱了墙板的水平抗侧力。与有墙板体系(试件 LWSF-1,LWSF-2)相比,无墙板试件 LWSF-3 的滞

回曲线呈现明显的弓形,滞回环的饱满度稍欠佳,说明墙板能提高体系的耗能能力,有利于结构抗震。

由图 15 与表 2 可知,试件 LWSF-1 与 LWSF-2 的承载力、延性明显高于对比空框架体系 LWSF-3。此外,各试件正负向曲线存在不同程度的不对称现象,试件 LWSF-1 的正向极限承载力比负向提高 10.6%,试件 LWSF-2 的负向极限承载力比正向提高 25.1%,试件 LWSF-3 的正向极限承载力比负向提高 11.4%。根据试件设计的对称性,理论上认为试件正负向极限承载力应保持一致性,造成该现象的主要原因在于:主体框架梁柱间的焊缝或连接件的焊缝不均匀,造成传力存在差异性。试件 LWSF-

1 与 LWSF-2 的上连接件焊缝质量情况分别如图 16 与图 17 所示,建议后续试验中提高焊缝质量,以提高墙板框架体系受力性能的稳定性。

2.3 骨架曲线

骨架曲线能直观反映出结构处于不同受力阶段的荷载-位移特性,是确定恢复力模型特征点的依据^[20]。各试件骨架曲线如图 18 所示。

由图 18 可知,试件 LWSF-2 的初始斜率最大,说明连接钢板越厚,越能显著提高体系的初始刚度。当位移 Δ 为 23 mm 左右时,各试件的骨架曲线斜率相差很小。当正向位移较大时,试件 LWSF-1 与 LWSF-3 的骨架曲线出现下降段,这是由于体系出

表 2 主要力学性能特征值

Tab. 2 Main Mechanical Property Eigenvalues

试件编号	加载方向	P_c /kN	Δ_c /mm	P_y /kN	Δ_y /mm	P_k /kN	Δ_k /mm	u
LWSF-1	正向	34.11	5.96	83.95	16.17	170.41	35.99	5.12
	负向	-29.72	-5.93	-63.44	-15.98	-152.51	-39.77	
LWSF-2	正向	46.26	5.79	96.95	15.74	149.09	29.88	4.29
	负向	-53.38	-5.82	-99.75	-15.77	-198.75	-29.81	
LWSF-3	正向			55.75	10.00	140.69	36.24	3.64
	负向			-35.12	-10.15	-114.98	-39.98	

注: P_c 为开裂荷载; Δ_c 为开裂位移; P_y 为屈服荷载; Δ_y 为破坏位移; P_k 为峰值荷载; Δ_k 为峰值位移; u 为延性系数。

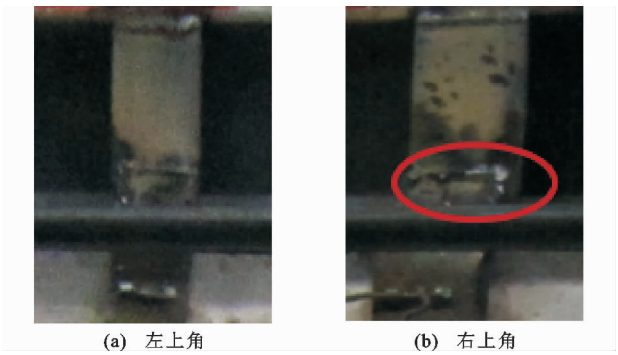


图 16 试件 LWSF-1 连接焊缝不整齐
Fig. 16 Unevenness of Connection Welds of Specimen LWSF-1

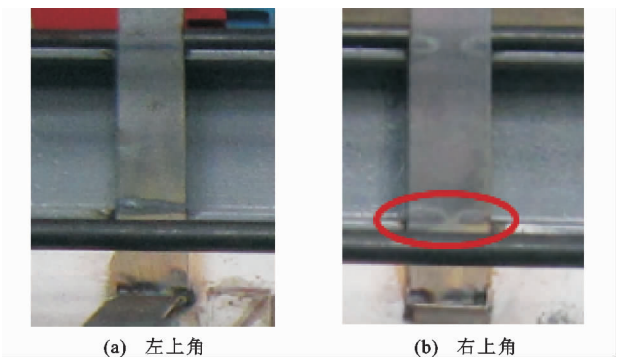


图 17 试件 LWSF-2 连接焊缝不均匀
Fig. 17 Uneven Connection Welds of Specimen LWSF-2

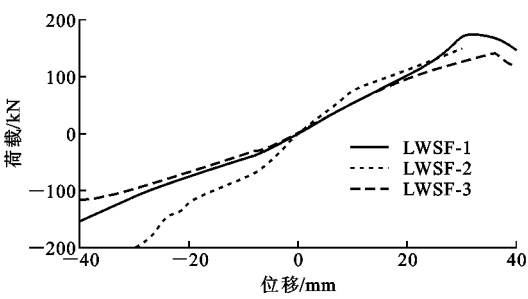


图 18 骨架曲线
Fig. 18 Skeleton Curves

现了不可恢复的塑性损伤。此外,各试件骨架曲线(正向或负向、正向与负向)未出现下降段,原因在于:试验后期时,连接件破坏严重,丧失连接能力,或主体框架柱底屈曲严重,停止加载。此时墙板仍具有一定的整体刚度,墙板框架间形成对角斜撑机制。

2.4 刚度退化

割线刚度 K_i 能够体现试件刚度退化规律,反映外荷载作用下结构损伤积累情况,其表达式为

$$K_i = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \tag{1}$$

式中: K_i 为第 i 次循环时的割线刚度; F_i 为第 i 次正(负)循环的峰值荷载; X_i 为第 i 次正(负)循环的峰值位移。

计算出各试件于每级位移下的刚度,并绘制刚度退化曲线,如图 19 所示。可以看出:试件 LWSF-2 的初始刚度最大,为 $10.1\text{ kN}\cdot\text{mm}^{-1}$,分别比试件 LWSF-1 与 LWSF-3 提高 29.5%,77.2%,说明钢板连接厚度影响体系的整体刚度,连接钢板越厚,体系的附加刚度越大。此外,试件 LWSF-2 刚度退化速率最快,试件 LWSF-1 与 LWSF-3 的刚度退化曲线较接近。

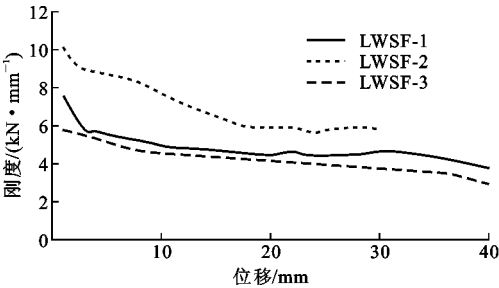


图 19 刚度退化曲线
Fig. 19 Stiffness Degradation Curves

2.5 耗能能力

耗能曲线如图 20 所示。由图 20 可知,各试件的耗能值随位移的增大而增加,相同位移情况下,试件 LWSF-2 的耗能最大,并且有墙板体系(试件 LWSF-1,LWSF-2)的耗能量大于无墙板体系(试件 LWSF-3),说明墙板与主体框架的协同较好,有利于体系的抗震。

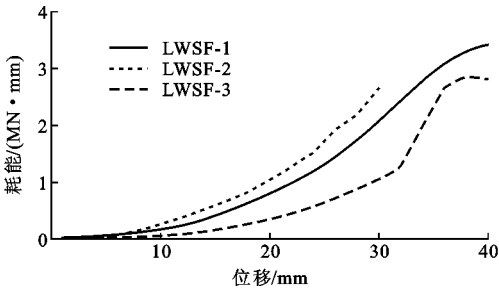


图 20 耗能曲线
Fig. 20 Energy Dissipation Curves

位移为 10,30 mm 时的耗能对比如表 3 所示。由表 3 可知,位移为 10 mm 时,有墙板体系(试件 LWSF-1,LWSF-2)的耗能倍数大于位移为 30 mm 时的耗能倍数,说明耗能提高在试验中期时体现较明显。

等效黏滞阻尼系数反映结构耗能的强弱,其表达式为

$$h_e = \frac{E}{2\pi P\Delta} \tag{2}$$

式中: h_e 为黏滞阻尼系数; E 为滞回环包裹面积; P 为滞回环正、负向的峰值荷载。

表 3 位移为 10,30 mm 时的耗能对比
Tab. 3 Comparison of Energy Consumption when Displacement Is 10 mm and 30 mm

试件编号	位移/mm	耗能/(kN·mm)	与对比试件 LWSF-3 提高倍数
LWSF-1	10	148	1.31
	30	1 813	0.97
LWSF-2	10	222	2.47
	30	2 319	1.52
LWSF-3	10	64	
	30	921	

各试件等效黏滞阻尼系数的对比情况如图 21 所示。由图 21 可以看出:各试件的等效黏滞阻尼系数随着位移增大而增加;当位移 $\Delta \leq 34\text{ mm}$ 时,试件 LWSF-3 的等效黏滞阻尼系数最小;当位移 $\Delta > 34\text{ mm}$ 时,各试件的等效黏滞阻尼系数相差较小,原因在于试件 LWSF-1 与 LWSF-2 的连接件丧失连接能力,退出工作;各试件等效黏滞阻尼系数保持在 0.013~0.087 之间。

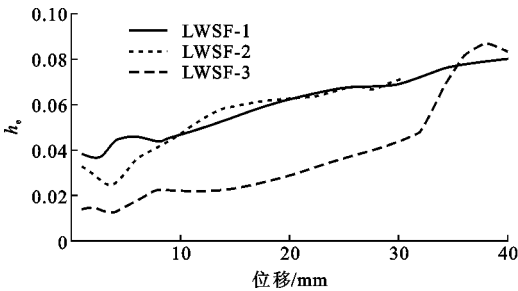


图 21 等效黏滞阻尼系数曲线
Fig. 21 Equivalent Viscous Damping Coefficient Curves

3 结 语

(1)钢板连接厚度影响体系的失效模式:连接钢板较薄时,连接件撕裂与开焊,除连接件附近混凝土开裂外,墙板基本完好;连接钢板较厚时,连接件基本完好,墙板斜对角开裂破坏。因此,建议连接节点强度与墙板间应进行合理匹配,从而提高墙板框架体系的整体性。

(2)基于钢板连接的夹芯墙板-钢框架体系能提高主体框架的承载力、延性与耗能能力等,有利于结构的抗震。钢板连接较厚时,虽能提高体系的初始刚度,但延性有所降低。

(3)本文提出的钢板连接方式不仅实现墙体的围护-保温-抗震一体化,并且使墙板与钢框架之间协调变形,表现出良好的整体性。

(4)钢板连接的焊缝质量影响体系的极限承载

力,导致正负向承载力的不对称性,后续试验应改进焊缝质量。当水平位移较大时,连接件失效、退出工作,墙板与框架形成对角斜撑机制。可为后续开展夹芯墙板与框架相互作用机理的研究提供理论指导。

参考文献:

References:

- [1] 吴函恒,秦沛远,陈军武,等. 水平荷载作用下钢框架-预制混凝土抗侧力墙体装配式结构的简化计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(3): 86-92.
WU Han-heng, QIN Pei-yuan, CHEN Jun-wu, et al. Simplified Calculation Method of Steel Frame-prefabricated Concrete Lateral Force Resisting Wall Structures Under Lateral Load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(3): 86-92.
- [2] 齐宝库,朱 娅,马 博,等. 装配式建筑综合效益分析方法研究[J]. 施工技术, 2016, 45(4): 39-43.
QI Bao-ku, ZHU Ya, MA Bo, et al. Analytic Method Study of Comprehensive Benefit of Precast Building[J]. Construction Technology, 2016, 45(4): 39-43.
- [3] 刘 鹏,陈 颖,罗小勇,等. 装配式建筑混凝土构件公差控制国内外标准分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(6): 41-49.
LIU Peng, CHEN Ying, LUO Xiao-yong, et al. Tolerance Control Analysis of Concrete Member for Prefabricated Construction in Domestic and International Standards[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(6): 41-49.
- [4] ASTM C236-89, Standard Test Method for Steady-state Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box[S].
- [5] TOMLINSON D, FAM A. Experimental Investigation of Precast Concrete Insulated Sandwich Panels with Glass Fiber-reinforced Polymer Shear Connectors[J]. ACI Structural Journal, 2014, 111(3): 595-606.
- [6] NAITO C, BEACRAFT M, HOEMANN J M, et al. Performance and Characterization of Shear Ties for Use in Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(1): 52-61.
- [7] WU G, WANG X, WU Z, et al. Durability of Basalt Fibers and Composites in Corrosive Environments[J]. Journal of Composite Materials, 2014, 49(7): 873-887.
- [8] 孟宪宏,周阿龙,刘海成,等. 夹心保温外墙板连接件力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2014, 130(2): 227-234.
MENG Xian-hong, ZHOU A-long, LIU Hai-cheng, et al. Experiments of Mechanical Properties on the Connectors Sandwich Insulation Wallboard[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2014, 130(2): 227-234.
- [9] 侯和涛,吴明磊,邱灿星,等. 钢框架与节能复合墙板连接方式的试验研究[J]. 山东大学学报:工学版, 2012, 42(3): 73-80.
HOU He-tao, WU Ming-lei, QIU Can-xing, et al. Experimental Research on Connections of Steel Frames and Energy-saving Composite Panels[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2012, 42(3): 73-80.
- [10] 张爱林,马 林,刘学春,等. 装配式外挂墙板钢框架受力性能有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增1): 152-157.
ZHANG Ai-lin, MA Lin, LIU Xue-chun, et al. Finite Element Analysis on Mechanical Performance of Steel Frame Structure with Prefabricated External Wall Panel[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S1): 152-157.
- [11] 郭宏超,孙立建,刘云贺,等. 柔性钢框架外挂再生混凝土墙结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(2): 63-73.
GUO Hong-chao, SUN Li-jian, LIU Yun-he, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Flexible Steel Frame with Recycled Concrete External Wall[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(2): 63-73.
- [12] 冯燕军. 纤维混凝土可更换式墙板填充钢框架结构抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(8): 140-144, 114.
FENG Yan-jun. Experimental Study of Seismic Behavior of Replaceable Fiber Concrete Wall Infilled Steel Frame[J]. Industrial Construction, 2016, 46(8): 140-144, 114.
- [13] 邱增美,李嗣昌,杨志坚,等. 蒸压轻质加气混凝土外墙板与钢梁连接节点的抗震性能试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(3): 163-168.
QIU Zeng-mei, LI Guo-chang, YANG Zhi-jian, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Connections Between Autoclaved Lightweight Aerated Concrete External Wall Panels and Steel Beams[J]. Industrial Construction, 2017, 47(3): 163-168.
- [14] 刘学春,周小俊,张译文. 外挂整体装配式墙体及连接抗震性能研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(7): 34-39, 33.
LIU Xue-chun, ZHOU Xiao-jun, ZHANG Yi-wen. Experimental Study of Seismic Performance of Integral Assembled Cladding Panels and Connections[J].

- Industrial Construction, 2017, 47(7): 34-39, 33.
- [15] 吴函恒, 周天华, 吕 晶. 钢框架-装配式混凝土抗侧力墙板结构受力性能[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2016, 46(1): 118-125.
- WU Han-heng, ZHOU Tian-hua, LU Jing. Mechanical Behavior of Steel Frame-fabricated Concrete Lateral Force Resisting Wall Structures[J]. Journal of South-east University: Natural Science Edition, 2016, 46(1): 118-125.
- [16] 魏文晖, 徐沛韬, 高 湛, 等. 框架-嵌入式墙体结构抗震性能试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(5): 92-99.
- WEI Wen-hui, XU Pei-tao, GAO Zhan, et al. Experimental and Analytical Study on Seismic Performance of Frame-embedded Walls [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(5): 92-99.
- [17] 王小玉. 内嵌轻质夹芯外墙板钢框架抗震性能试验研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2017.
- WANG Xiao-yu. Experimental Study on Seismic Behavior of Steel Frame with Embedded Lightweight Sandwich Panels [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2017.
- [18] 杨艳敏, 章润涛, 王小玉. 全轻混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(5): 96-102.
- YANG Yan-min, ZHANG Run-tao, WANG Xiao-yu. All-lightweight Aggregate Concrete Shear Wall Seismic Performance[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(5): 96-102.
- [19] 杨艳敏, 王小玉, 黄志明, 等. 钢框架内嵌外墙板连接件抗剪性能研究[J]. 混凝土, 2018(6): 141-143.
- YANG Yan-min, WANG Xiao-yu, HUANG Zhi-ming, et al. Research on Connecting Members Between Steel Frame and Embedded Wall Panel [J]. Concrete, 2018(6): 141-143.
- [20] 唐 伟, 胡夏闽, 王家骥, 等. 节能墙板对 RC 框架抗震性能影响的试验研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(1): 137-143.
- TANG Wei, HU Xia-min, WANG Jia-ji, et al. Experiment Study on Influence of Energy Saving Wall Board on Seismic Behavior of RC Frames[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(1): 137-143.