第30卷第2期

2022年4月

DOI:10.11921/j.issn.2095-8382.20220202

外挂 ALC 组合式摇摆节点试验研究与数值模拟

崔建华,纵 达

(安徽建筑大学 土木工程学院,安徽 合肥 230601)

摘 要:为了优化外挂 ALC-钢框架组合结构的抗震性能,提出了一种新型外挂 ALC 墙板连接节点一组合式 摇摆节点。首先对外挂钩头螺栓节点和组合式摇摆节点进行了低周往复加载试验;然后从试验现象、滞回曲 线、骨架曲线、刚度退化曲线和耗能曲线分析了两组构件的差异;最后通过有限元软件建立了组合式摇摆节 点的模型。试验结果表明:组合式摇摆节点的使用有效减缓了地震荷载对外挂 ALC 墙板的影响,并提高了外 挂 ALC 墙板 – 钢框架组合结构的承载力和抗震性能。建立的模型为分析不利荷载对组合结构的影响提供理论 支持。

关键词:钢框架;蒸压加气混凝土板;抗震试验;有限元
中图分类号:TU391
文献标识码:A
文章编号:2095-8382(2022)02-007-07

Experimental Study and Numerical Simulation of External ALC Combined Swing Connector

CUI Jianhua, ZONG Da

(College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to optimize the seismic performance of the external ALC-steel frame combination structure, a new type of external ALC wall panel connector – combined swing connector is proposed. First of all, the external hook head bolt connector and the combined swing connector were tested by low cyclic loading. Then, the differences between the two groups of members were analyzed from the test phenomenon, hysteresis curve, skeleton curve, stiffness degradation curve and energy dissipation curve. Finally, the model of the combined swing connector was established by finite element software. The experimental results show that the use of the combined swing connector effectively reduces the seismic loads on the external ALC wall panel, improves the bearing capacity and seismic performance of the external ALC-steel frame wall panel combination structure, and the established model provides theoretical support for analyzing the impacts of adverse loads on the combination structure.

Keywords: steel frame; autoclaved aerated concrete panel; seismic test; finite element

建筑绿色低碳化发展,可以提升建筑节能与绿 色建筑发展质量和效益^[1]。近些年,装配式建筑作 为绿色建筑的一种得到了普遍应用,但与西方国家 相比仍然有较大的差距^[2]。现有主体结构的设计、 施工、运输和安装已经基本实现产业化,但是墙体 施工以现场的湿作业为主,这会导致生产成本提高 和建筑原材料浪费,对预制围护墙体的研究势在必 行。有学者通过替换或添加蒸压加气混凝土(ALC) 板中的原材料来研究它们的力学性能,改造后的 ALC板材抗拉和抗压强度都有了明显提升^[3]。采

收稿日期: 2021-10-23

基金项目: 安徽省高校协同创新项目(GXXT-2019-005)

作者简介: 崔建华(1963-), 女, 教授, 主要研究方向: 计算结构力学及其应用。

用纤维材料进行平面内加固可以提高结构的抗剪 和抵抗变形的能力^[4-5],ALC 墙板拼缝之间的粘结 强度也可以通过改变填缝剂的材料来实现^[6]。构 件之间的连接方式会影响结构的受力性能,对于 ALC 连接件的研究主要还是集中在 U 型卡节点、 钩头螺栓节点、滑动螺栓节点等传统节点。但是对 类似于梁柱连接、组合梁连接、叠合板拼缝之间的 连接方式创新较少^[7-12]。

基于上述情况,本文提出了一种 ALC 外挂 组合式摇摆节点,该节点不仅解决了施工误差 和节点安装的问题,还优化了外挂 ALC 墙板,钢 框架组合结构的受力性能。将其与传统的外挂 钩头螺栓节点组进行对比,分析滞回性能、骨架 曲线、刚度退化、耗能能力等指标,同时对两组节 点进行有限元仿真分析,验证两组节点的抗震 性能。

1 试验设计

1.1 试件设计

通过对阜阳职业技术学院新校区建设项目 中的 ALC 外墙板安装工程进行调研发现,现场的 ALC 墙板与主体结构的连接主要把角钢固定在主 体结构上,再对 ALC 墙板进行现场钻孔和切槽,将 墙板吊装到位,通过螺栓孔道使用钩头螺栓与角钢 进行焊接。施工过程中发现,由于螺栓孔道定位不 精确导致钩头螺栓与角钢无法准确焊接,以及工人 按照经验随意开槽导致过度损坏 ALC 墙板。这不 仅不利于保证墙板的整体性,还有可能导致墙板在 地震中脱落,造成二次失稳。基于上述存在的问题, 本文提出了一种组合式摇摆连接件,主要由上下两 部分组成,上部 Z 节点的长圆孔一方面可以避免现 场工人钻孔不精准导致左右方向施工误差;另一方 面,在地震荷载作用下,突破螺栓摩擦力,螺栓在长 圆孔中来回滑动,减少地震荷载对墙板的影响。上 部Z节点和L节点的组合可以避免因为墙板螺栓 孔道定位不准确导致的上下方向施工误差。下部 节点采用承托板与承重孔组合的形式,在地震的 剪切波作用时,墙板将以下支托板为支点做摆动, 适当减少地震荷载对墙板的影响,节点尺寸如图1 所示。



1.2 试件设计

本试验共制作了两组试件 FW1、FW2。其中: FW1 为钩头螺栓外挂 ALC 墙板框架,FW2 为 组合式摇摆节点外挂 ALC 墙板框架。试验框架均为单层单跨, 钢梁与钢柱采用栓焊连接, 框架尺寸如图 2 所示。H型钢柱截面规格为 H200×200×8×12, 材料选用 Q235B;H型钢梁截 面规格为 H244×175×7×11, 材料选用 Q235B。 试件 FW1、FW2 的墙板均采用 5 块规格相同的 ALC 板材, ALC 板材的截面尺寸为 3000 mm×600 mm×200 mm。

1.3 材性实验

根据"强节点弱构件"的原则,本文设计的连接件选择 Q345 级钢材,ALC 墙板选择高迪生产的 3.5 MPa 型蒸压加气混凝土板材。根据规范 GB/T11969-2020《蒸压加气混凝土的试验方法》^[13]和 GB/T228.1-2010《金属材料 - 拉伸试验》^[14]对与试验相同批次的 ALC 墙板和钢梁柱关键部位进行取 材试验,试验结果见表 1、表 2。

试件	试件尺寸 (mm)	标准抗压强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)
试块1	$100\times100\times100$	3.89	
试块 2	$100\times100\times100$	2.97	
试块 3	$100\times100\times100$	3.26	
试块 4	$100\times100\times100$	3.78	
试块 5	$100\times100\times100$	3.96	
试块 6	$100\times100\times100$	3.49	
平均值		3.56	
试块1	$100\times100\times300$		1640
试块 2	$100\times100\times300$		1880
试块 3	$100\times100\times300$		1790
平均值			1770

表1 ALC 材性试验结果

表 2 钢材材性试验结果

试件	厚度 (mm)	屈服强度 (N/mm ²)	极限强度 (N/mm ²)	伸长率
梁翼缘	11	263.4	401.6	25.2%
梁腹板	7	275.3	411.3	22.3%
柱翼缘	12	289.5	435.4	24.7%
柱腹板	8	278.2	409.8	20.8%
Q345	10	376.6	510.1	19.6%

1.4 试验装置

本次试验在建筑结构与地下工程安徽省重点 实验室进行,使用量程为 ± 250kN 的 MTS 作为加 载装置,如图2所示。依据规范GB50011-2019 《建筑抗震设计规范》^[15]采用1/600(5 mm)、1/500 (6 mm)、1/400(7.5 mm)、1/350(8.6 mm)、1/300 (10 mm)、1/250(12 mm)、1/200(15 mm)、1/100 (30 mm)、1/75(40 mm)、1/50(60 mm)、75 mm、 90 mm和105 mm等位移角,加载制度如图3所示。 以推为正、以拉为负的方式进行位移加载,在试验 前采用米郎位移计和应变片采集关键位置的实时 数据。



图 2 构件安装图示意图



图 3 加载制度图

2 试验现象与分析

2.1 试验现象

试件的破坏主要分为以下几个阶段:① ALC 墙板间拼缝砂浆的碎裂和脱落;②墙板出现小碎块 的脱落;③螺栓孔道被拉大或者出现八字形裂缝; ④钢梁柱连接处的焊缝出现断裂。试验现象之间 的差异主要在于墙板破坏的产生时间和裂缝的开 展程度,具体的试验现象见表 3 和图 4、图 5。

		北外		
位移	试件编号			
/mm	FW1	FW2		
± 5	试件的无明显	也变形和裂缝		
±6	1、2号板缝底部的拼缝砂浆 出现了一些微小的裂缝	无明显变形和裂缝		
± 10	ALC 粉末和小碎块开始脱落	未见明显现象		
±15	墙板间出现明显的错动,钩头 螺栓附近的螺栓孔被拉大	板底部出现肉眼不可见的小 裂缝		
± 40	3 号板下部钩头螺栓孔处出 现"八"字形裂缝	有少量 ALC 小碎块脱落,5 号板后面的板角产生微裂缝		
± 60	各板间拼缝陆续失去作用	4号板背部板角碎裂		
± 75	其中一个钩头螺栓与角钢的 焊缝处发生断裂	1号、2号板底出现新的竖向 裂缝		
± 90	各节点处八字形裂缝继续扩 大并加宽;梁柱节点焊缝断裂	1、2 号和 3、4 号板间拼缝砂 浆陆续崩开		
± 105	墙板出现大面积斜裂缝	1 号板和5 号板下部节点螺 栓孔处出现八字形裂缝		
1				

表 3 试验现象

(a) 拼缝砂浆碎裂脱落



(c)板角大面积破碎(d)焊缝断裂图 4 外挂钩头螺栓组试验现象



(a) 墙板拼缝开裂



(b)出现八字形裂缝

(b)板角和砂浆脱落



(c)板间错动
(d)节点部位相对滑移
图 5 组合式摇摆节点组试验现象

2.2 滞回曲线

试验过程中 MTS 系统自动记录了各试件的滞 回曲线,如图 6 所示。FW1 钩头螺栓组的极限荷 载为 168.88 KN,破坏荷载为 143.55 KN;FW2 组合 型新型连接节点组的极限荷载为 200.1KN,破坏荷 载为 170.1 KN。新型节点的 FW2 比 FW1 的承载 力更高,抵抗地震的能力更好。FW2 比 FW1 的承载 力更高,抵抗地震的能力更好。FW2 比 FW1 的滞 回曲线更加饱满,包围的面积更大,说明 FW2 比 FW1 耗能效果更好。从两组曲线的对比中还可以 观察到它们的正向和反向数值都不对称,其中反向 的承载力值大于正向的承载力值。在加载初期,螺 栓突破摩擦之后处于摇摆耗能状态。当试验进行 到后期时,由于螺栓与长圆孔的边界接触,FW2 组 表现出比 FW1 组更高的刚度和承载能力。



2.3 骨架曲线

在水平往复荷载作用下,荷载一位移曲线中 各级加载第一次循环的峰值点所连接起来的外 包络线即为骨架曲线,可定性衡量结构抗震性能, 是研究非弹性构件抗震性能的重要参数。对比 图 7 两组骨架曲线可知,加载初期 FW1、FW2 骨 架曲线趋势相似,正向位移和反向位移不对称。 在到达弹塑性位移角 1/50 之前,FW1 的承载力 比 FW2 的承载力小,这是由于螺栓在长圆孔中滑 动,减少了地震荷载对墙板的冲击。随着位移增 大,FW2 的峰值比 FW1 的峰值提高了 15.3%,此 时 FW2 组的螺栓孔道无明显变化,而 FW1 螺栓 孔道周围出现了明显的八字形裂纹。FW2 组由于 墙板表现出较好的随动性能,延缓了梁柱连接处 和 ALC 墙板的破坏,保证了墙板的稳定性和保温 性能。





2.4 刚度退化

采用割线刚度(K)来反映两组连接件在低周 往复荷载加载作用下结构累积损伤情况^[16],如下 所示:

$$K = \frac{\left| +F_{i} \right| + \left| -F_{i} \right|}{\left| +X_{i} \right| + \left| -X_{i} \right|}$$
(1)

式中, $|\pm F_i|$ 和 $|\pm X_i|$ 分别是第 *i* 个加载工况的峰值 荷载和峰值位移的绝对值。

如图 8 所示,加载初期两组构件的斜率是定 值且呈线性。经过线弹性阶段后,FW1 的数值略 高于 FW2,这是由于试件在长圆孔处产生滑移,有 效释放能量,避免墙板受到破坏。到了加载后期, FW2 下降斜率明显小于 FW1,说明螺栓到达限位 后连接件可以提供很好的刚度。



2.5 耗能分析

结构耗散能量能力由力 - 位移曲线所封闭的 面积(E)来衡量^[16],如式 2 和图 9 所示:

$$E = \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{OBF} + S_{ODF}}$$
(2)

式中,*S_{ABC}*为滞回曲线 ABC 的面积;*S_{CAD}*为滞回曲线 CAD 的面积;*S_{OBE}*为三角形 OBE 的面积;*S_{ODF}*为三角形 ODF 的面积。



图 9 耗散能力公式面积示意图

结构的能量耗散能力与滞回环的面积密切相 关。结构耗散的能量越多,结构就越安全,越不容 易被损坏。如图 10 所示,两组曲线的趋势几乎相 同。在小位移时,因为构件处于线弹性阶段,两曲 线基本重合。随着位移的增加,两组曲线的分化逐 渐明显,FW2 的斜率大于 FW1,尤其是在位移达到 60 mm 之后,此时螺栓已经和上部节点的长圆孔边 界接触,继续为构件提供承载力和能量耗散的能 力,在罕遇地震中,组合式摇摆节点可以更好减少 墙板所受的不利荷载影响。

11

第2期



3 组合式摇摆节点模型分析

为了充分反映带有新型组合摇摆连接件构件 的受力机理,对外挂 ALC-钢框架组合结构进行一 系列的验证分析。数据模拟分析采用 ABAQUS 有 限元软件^[17]。

3.1 模型建立过程

为了更好地还原试验构件的实际情况,对模型 进行以下设置:钢梁柱构造、钢筋位置分布、钢筋直 径、ALC 板材等级方面均与实际构件一致,详见下 表 4、表 5。首先在 Part 选项里合理划分构件,确保 画出的网格规整。为提高仿真收敛和计算精度,钢 梁柱和连接件采用三折线模型,螺栓和内置钢筋网 片采用双折线模型。本模型采用塑性损伤模型模 拟 ALC 墙板的拉压状态。对于模型之间的相互作 用,包括连接件与连接件之间、连接件与 ALC 墙板 之间、螺栓与墙板之间、螺栓与连接件之间和螺栓 与钢梁柱之间均采用硬接触,并将摩擦系数设置为 0.2; 墙板与墙板之间采用摩擦系数为0.4 的硬接触。 在边界条件中,令柱脚三个方向平动和转动完全固 定,即:U1=U2=U3=0, 01= 02= 03=0。在梁端设以 一个耦合点,并对耦合点施加反复循环荷载来模拟 实际情况^[18-19],柱脚钢梁柱、连接件、螺栓采用合 适尺寸的 C3D8R 实体单元,ALC 板内钢筋采用合 适尺寸的桁架单元,模型网格划分详见图 11。

表 4 蒸 法加 气 混凝 土 损	〕伤塑性模型参数
-------------------	----------

膨胀角	离心率	fbo/fco	K	粘性系数
30	0.1	1.16	0.667	0.005
表 5 ALC 材性参数				
材料	密度(t/mm ³)	弹性模量	∎(MPa)	泊松比
ALC 板	5×10^{-10}	18	00	0.2



3.2 有限元结果分析

组合式摇摆节点组的有限元计算结果,如图 12 所示。构件的应力集中点主要出现在梁柱连接 周围,模拟滞回曲线比试验曲线更加丰满,这是由 于试验构件在安装过程中会存在小的间隙,或者地 梁产生滑移等。模拟和试验的骨架曲线正反向的 趋势存在一定差异,这是由于在材料设置中只考虑 了各向同性,而试验过程中钢梁柱和墙板等构件在 受拉和受压过程中的变形和裂缝开展趋势不同,构 件的"捏缩"效应大体相当。上述的误差在合理范 围之内,ABAQUS 模拟结果与试验结果基本一致。



(b)组合式摇摆节点模型的滞回曲线对比



4 结论

通过对新提出的外挂 ALC 板组合式摇摆节点 进行试验和模拟,得出以下结论:

(1)组合式摇摆节点组中长圆孔的设置有效推 迟了 ALC 墙板的破坏。具体来说,外挂钩头螺栓 组在加载至 6 mm 时,ALC 墙板之间的拼缝发生破 坏,而组合式连接节点出现拼缝砂浆碎裂则发生在 加载至 40 mm 时,组合式摇摆节点的使用增强了 外挂 ALC 墙板 – 钢框架组合结构抗震性能。

(2) 与外挂钩头螺栓组相比,组合式摇摆节 点组的屈服荷载和峰值荷载分别增加了 10.6% 和 15.3%,屈服位移和峰值位移分别增加了 12.6% 和 29.9%,并且在到达峰值后仍然能提供比钩头螺栓 更高的承载力。

(3)组合式摇摆节点的刚度退化现象明显小于 外挂钩头螺栓节点,并且前者的耗能能力优于后者。 可见组合式摇摆节点能够有效提高外挂 ALC-钢 框架组合结构的抗震性能。

(4)本文建立了组合式螺栓节点组的有限元模型,并与试验的应力云图、滞回曲线和骨架曲线进行了比较,验证了模型的准确性。

参考文献:

- [1] 住建部:发布《"十四五"建筑节能与绿色建筑发展规划》[J]. 节能与环保,2022(3):6.
- [2] 李文, 王中有, 唐璠, 等. 基于工业化生产的装配式建 筑应用与发展对策[J]. 江西建材, 2021(4):4-7.
- [3] Seddighi F, Pachideh G, Salimbahrami S B.A study of mechanical and microstructures properties of autoclaved aerated concrete containing nano-graphene[J].Journal of Building Engineering, 2021, 43: 103106.

- [4] Penna A, Mandirola M, Rota M, et al.Experimental assessment of the in-plane lateral capacity of autoclaved aerated concrete (AAC) masonry walls with flat-truss bed-joint reinforcement[J].Construction and Building Materials, 2015, 82:155-166.
- [5] De Paula Salgado I, de Andrade Silva F.Flexural behavior of sandwich panels combining curau á fiber-reinforced composite layers and autoclaved aerated concrete core[J]. Construction and Building Materials, 2021, 286:122890.
- [6] Kałuża M.Analysis of in-plane deformation of walls made using AAC blocks strengthened by GFRP mesh[J].Procedia Engineering, 2017, 193: 393–400.
- [7] 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 (S2):56-61.
- [8] 李锋, 姬淑艳, 姜宝龙, 等. 外挂 ALC 墙板 钢框架及 连接节点受力性能研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学 版), 2022, 49 (3): 133–144.
- [9] 丁克伟,叶堉.装配式混凝土梁柱节点抗震性能试验与数值模拟[J].建筑科学与工程学报,2021,38(4):24-32.
- [10] 丁克伟,刘建华,马巍,等.新型装配式半刚性节点抗震 性能试验研究[J].土木工程学报,2021,54(4):1-7,56.
- [11] 丁克伟,陈伟.装配式混凝土梁柱节点抗震性能试验和 恢复力模型研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021,37(1):51-60.
- [12] Ding K W, Zhang X Q, Liu Y L, et al.Research on angle connector in composite beam[J].International Journal of Concrete Structures and Materials, 2022, 16:15.
- [13] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.蒸 压加气混凝土性能试验方法:GB/T 11969—2020[S].北 京:中国标准出版社,2020.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部,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.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.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.
- [17] 齐威 .ABAQUS 6.14 超级学习手册 [M]. 北京:人民邮电 出版社,2016.
- [18] Zhang C K, Ding K W, He S L.Seismic performance of panel connectors with steel frame based on autoclaved lightweight concrete (ALC) [J].Buildings, 2022, 12 (3): 372.
- [19] Ding K W, Ye Y, Ma W.Seismic performance of precast concrete beam-column joint based on the bolt connection[J].Engineering Structures, 2021, 232:111884.