

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.180

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



水平钢筋连接对装配式复合剪力墙节点抗震性能的影响

马少春^{1,2}, 方宏远², 鲍鹏¹, 姜忻良³

(1. 河南大学 土木建筑学院, 河南 开封 475004; 2. 郑州大学 水利科学与工程学院, 郑州 450001;
3. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要:为研究水平钢筋连接方式对复合剪力墙节点抗震性能的影响规律,设计了水平钢筋伸入暗柱或不伸入暗柱两类组合节点。在循环荷载作用下,对两类节点共4个试件分别进行了抗震试验。通过对复合剪力墙节点的受力变形、破坏特征、滞回特性、延性以及耗能能力等方面进行研究,分析了复合剪力墙连接节点的抗震性能。通过对承载及变形、延性及耗能等指标进行对比分析发现:水平钢筋连接节点的开裂、屈服及极限荷载分别提高了2.42%、10.84%和9.25%;延性系数提高了10.26%;耗能系数提高了8.70%。研究结果表明:对剪力墙节点进行合理配筋和连接,可以有效地提高节点试件的整体抗震性能。

关键词:低周反复试验;剪力墙节点;抗震性能;装配式;滞回曲线

中图分类号: TU398; TU 364 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)03-0044-07

Influence of horizontal steel bar connection on seismic performance of assembled composite shear wall joints

MA Shaochun^{1,2}, FANG Hongyuan², BAO Peng¹, JIANG Xinliang³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475001, Henan, P. R. China; 2. College of Water Conservancy & Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: In order to study the influence of the horizontal steel bar connection method on the seismic performance of the composite shear wall joints, this paper designed two types of composite joints, which were horizontal reinforcements with or without embedded column. Under cyclic loading, a total of four specimens of two types of joints were subjected to seismic tests. By studying the deformation, failure characteristics, hysteretic characteristics, ductility and energy dissipation capabilities of the composite shear wall node, the seismic performance of the composite shear wall connection node is analysed. Through comparative analysis of bearing and deformation, ductility, energy consumption and other indicators, it is

收稿日期: 2020-07-12

基金项目: 国家住房和城乡建设部科技计划(2018-K9-065); 中国博士后科学基金(2018M632805); 河南省高等学校重点科研项目(18A560007); 开封市科技攻关项目(2001010)

作者简介: 马少春(1982-), 男, 博士(后), 副教授, 主要从事装配式建筑及工程抗震研究, E-mail: mashaochun2627@126.com.

Received: 2020-07-12

Foundation items: The Science and Technology Project of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development (No. 2018-K9-065); China Postdoctoral Science Foundation Funded Project (No. 2018M632805); Foundation of Henan Educational Committee (No. 18A560007); Key Scientific and Technological Project of Kaifeng City (No. 2001010)

Author brief: MA Shaochun (1982-), PhD, postdoctor, associate professor, main research interests: prefabricated buildings and engineering seismic, E-mail: mashaochun2627@126.com.

obtained that the cracking, yielding and ultimate load of the joints of horizontal steel bars are increased by 2.42%, 10.84% and 9.25% respectively; the ductility coefficient is increased by 10.26%; the energy consumption coefficient has been increased by 8.70%. It can be seen that the overall seismic performance of the joint specimens can be effectively improved by reasonable reinforcement and connecting the shear wall nodes.

Keywords: low-cycle repeated test; shear wall joint; seismic performance; assembly type; hysteresis curve

近年来,环境污染、能源资源短缺、大力发展绿色节能装配式建筑一直是各国关注的热点问题。中国大力发展绿色环保、低碳节能的新型装配式建筑^[1],力争到2020年实现城镇新建建筑节能达到65%的目标。在围护结构墙体上的节能是最直接、最经济、最有效的措施,但传统墙体材料污染环境,并且消耗的能源资源也较大。因此,寻找低能耗、低成本、绿色环保墙体材料,大力推进墙体材料革新给研究人员提出了挑战^[2]。石膏是一种绿色气硬性胶凝材料,被广泛地应用于制作复合墙板^[3]。石膏具有质量较轻、成本低廉、对环境无污染的突出优点,在建筑材料中充当较好的耐火材料。材料内部的多孔隙使石膏又具有较好的保温隔热功能,非常适合应用于新型复合墙板或组合节点中。可以将石膏做成石膏空腔,充当复合墙板的免拆模板,然后在石膏空腔中配置钢筋并浇筑混凝土填充材料形成复合的墙板或节点。

为了解石膏复合剪力墙的受力性能,找到其受力最优的设计方案,许多研究者进行了大量的试验研究^[4-6],但其大多针对单独复合剪力墙构件,对于石膏混凝土复合剪力墙与连接节点核心区混凝土异形暗柱之间关于水平钢筋连接方式的研究相对较少。装配时钢筋的连接工作量大且质量不易保证,因此,寻找腹板和翼缘与节点核心区异形柱钢筋的合理连接方式是一种可行的解决方案^[7]。笔者严格按照有关抗震试验规范的要求对装配式复合剪力墙节点进行试件连接方式构造分析和抗震性能试验,通过对组合节点各试件的受力变形、裂缝状况、破坏形态、滞回特性、延性、刚度退化以及能量耗散系数等指标进行研究,进而研究装配式复合剪力墙与节点暗柱之间采用水平钢筋不同连接方式对组合节点力学性能的影响规律。

1 试验概况

1.1 构件设计

装配式复合剪力墙节点中的石膏孔隙模板是在工厂中将建筑石膏与一定量水泥、纤维以及一些外

加剂按照特定的配合比生产的多空腔石膏板产品^[8],节点翼缘中的石膏板与保温系统也是在工厂中生产的一体产品。腹板石膏板基本尺寸为:侧板厚13 mm;隔板厚20 mm,高160 mm;水平孔隙94 mm×220 mm;垂直孔隙230 mm×94 mm。翼缘系统基本尺寸为:保温板厚120 mm;最外侧石膏单板厚13 mm。将翼缘和腹板的石膏板部件运输到施工场地进行组装、插入配筋并采用混凝土填入石膏空腔。在翼缘和腹板交接处,根据预留混凝土异形暗柱的形状和尺寸将一些石膏隔板去掉,配置钢筋并浇筑混凝土形成节点核心区暗柱。

设计两组共4个复合剪力墙节点,其基本形状和尺寸相同。试件通过节点核心区连接件(T形暗柱)将墙板腹板与墙板翼缘连接为节点整体。通过抗震试验研究,重点关注翼缘和腹板与节点核心区连接件之间的连接情况。构件设计处理方法为:在复合剪力墙与节点混凝土暗柱之间,采用水平钢筋伸入或不伸入核心区暗柱贯通节点的两种不同连接方式。将水平钢筋伸入核心区贯通节点的情况称为贯通节点,共3个试件,如图1所示。将无水平钢筋伸入暗柱不贯通节点的情况称为非贯通节点,将其作为1个对比试件,如图2所示。剖面图如图3和4所示。两类节点编号分别为GTJ-1、GTJ-2、GTJ-3和FGTJ。节点主要包括T形暗柱、腹板、翼缘、加载梁、固定梁。腹板无保温板,翼缘有外保温板。加载梁尺寸为120 mm×220 mm;固定梁尺寸分别为

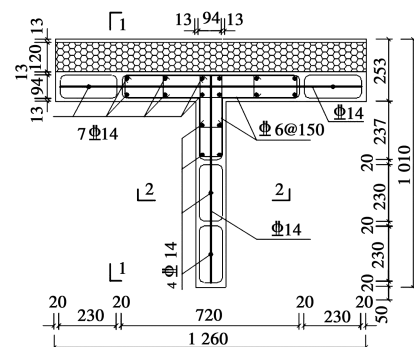


图1 GTJ试件平面图(mm)

Fig. 1 GTJ sample plan(mm)

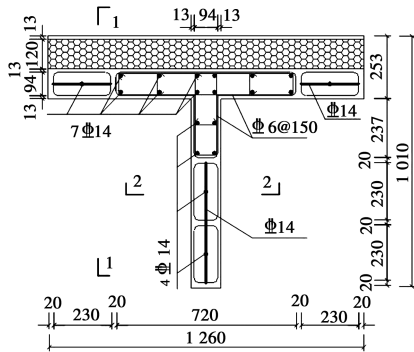


图 2 FGTJ 试件平面图(mm)
Fig. 2 FGTJ sample plan(mm)

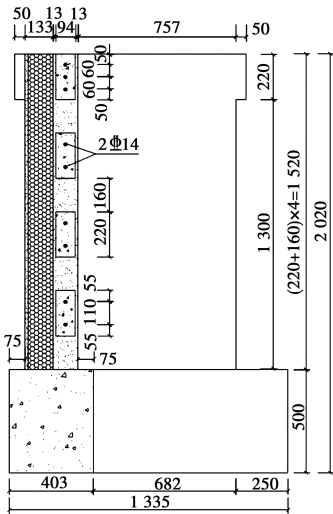


图 3 1-1 剖面图(mm)
Fig. 3 Sectional view of 1-1(mm)

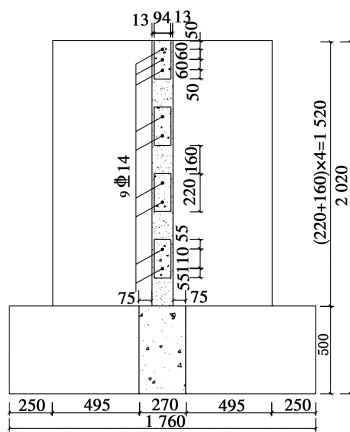


图 4 2-2 剖面图(mm)
Fig. 4 Sectional view of 2-2(mm)

270 mm×500 mm(腹板底部)和 403 mm×500 mm(翼缘底部)。核心区竖向钢筋为 16 Φ 14, 箍筋为 A6@150。在竖向石膏腔中配置 1 Φ 14 钢筋, 在水平石膏腔中配置 2 Φ 14 钢筋; 在加载梁中配置 3 Φ 14 纵向钢筋; 在地梁中配置 4 Φ 20 纵向钢筋, 地梁箍筋 C8@200。

1.2 试验加载装置与测试

为了模拟复合剪力墙节点的真实受力情况, 试验主要在水平和垂直两个方向进行加载^[9]。垂直方向: 竖向荷载值为 122 kN, 轴压比为 0.1, 通过 3 台 50 kN 的液压千斤顶施加在节点顶部钢梁上, 可以较真实地模拟节点上部的结构荷载均匀地传递给节点, 还可避免应力集中影响。在千斤顶顶部设置滚轴支座, 实现 3 台千斤顶在保证竖向恒荷载的同时可以伴随节点在水平方向同步移动。水平方向: 在腹板顶部一侧设置 1 台 1 000 kN 的推拉千斤顶用来模拟水平地震作用。推拉千斤顶一端与反力墙进行固定, 另一端可通过传感器、固定装置与节点试件进行连接。拟静力试验加载过程主要分为两部分: 1) 预加载, 取预估 30% 开裂荷载作为预加载试验的控制荷载; 2) 正式加载, 参照试验规范中的要求, 采用荷载与位移混合加载方式。在低周反复加载试验中, 当试件达到屈服之前, 主要采取荷载控制, 每级水平荷载控制级为 10 kN 并往复 3 次; 当达到屈服之后改为位移控制, 取屈服位移倍数作为位移控制级并往复加载 3 次。直到试件的承载力下降至峰值荷载的 85% 以下, 构件破坏, 试验结束。加载系统与试验装置如图 5、图 6 所示。为了研究复合剪力

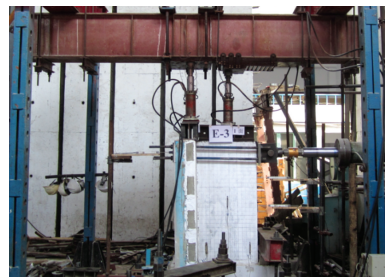
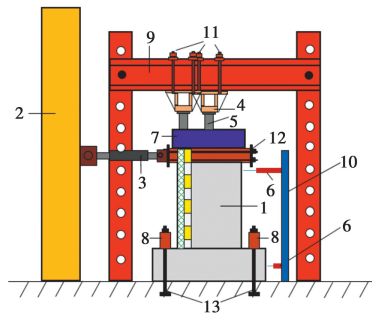


图 5 现场加载装置
Fig. 5 On-site test loading device



注: 1.试件 2.反力墙 3.作动器 4.传感器 5.千斤顶
6.位移计 7.加载梁 8.固定梁 9.反力架 10.立杆
11.固定螺栓 12.连接装置 13.螺栓

图 6 试验循环加载装置

Fig. 6 Test set-up for cyclic loading

墙节点的抗震性能以及考虑水平钢筋不同连接方式对其性能的影响,试验主要测量内容为:节点顶部荷载及变形、裂缝的产生与发展、试件下部固定梁位移、试验误差。根据研究经验可知,试验破坏多发生在试件的中下部,因此,在试验过程中对其进行了重点关注。

试件开裂前,采用水平力控制并以预估开裂荷载的50%为初始荷载分级加载,每级水平力以10 kN为级差往复一次;试件开裂后,采用水平位移控制加载,每级位移循环两次,直至试件承载力降低到峰值荷载的85%以下,或试件无法稳定地承受反复荷载时,停止加载。

2 现象及破坏形态

在预加载试验阶段,当荷载为30.00 kN时,几乎无异常现象。当荷载为101.59 kN时,首先在GTJ节点腹板右下角出现水平方向的初始裂缝,约600.00 mm长,并有延长趋势。当荷载为100.75 kN时,FGTJ试件具有相似的现象。复合剪力墙与暗柱的不同连接方式对节点初始裂缝的开裂无关,在此阶段,翼缘几乎无变化。当GTJ荷载为150.55 kN时,在节点的腹板中部出现几条 45° 或 135° 方向的斜裂缝,已有裂缝加宽并延伸至腹板的根部。当FGTJ荷载为150.42 kN时,复合剪力墙中发出撕裂声,腹板上形成主裂缝,长度为230.00 mm;当GTJ荷载为180.00 kN时,腹板的最外侧钢筋发生了屈服。腹板左上部出现几条长200.00 mm的斜裂缝,之后采用位移来控制。当荷载为170.45 kN时,FGTJ腹板钢筋出现了屈服现象。当加载至1倍屈服位移 Δ_y 时,GTJ和FGTJ均进入弹塑性阶段,裂缝继续发展。当位移为 $2\Delta_y$ 时,GTJ腹板裂缝出现加宽和延长现象,在腹板中部的斜裂缝,由于相互交叉而形成网格。另外,在翼缘上出现了竖向微裂缝,FGTJ竖向、水平及斜向裂缝增多和延长相对较快。复合剪力墙与暗柱的不同连接方式对GTJ和FGTJ节点的裂缝开裂规律影响显著。比如,出现裂缝的局部区域不同,裂缝发展的方向也有所不同。当位移为 $3\Delta_y$ 时,GTJ腹板脚部的裂缝显著变宽,FGTJ腹板与暗柱结合区域的竖向裂缝已基本形成并贯通,竖向裂缝的宽度显著增大。当位移为 $3.5\Delta_y$ 时,GTJ翼缘出现水平裂缝,腹板脚部的混凝土和石膏被压碎,钢筋被反复拉长或压弯,水平反复荷载降至 $0.85P_y$ 以

下。FGTJ腹板与暗柱结合区域裂缝加宽,在翼缘中部出现水平裂缝,长680.00 mm,腹板表面材料局部剥落。

总之,GTJ最终破坏形式为腹板脚部混凝土被压碎或拉裂、钢筋被拉长或压弯,或者 45° 方向产生破坏的斜向贯通裂缝,如图7所示。FGTJ最终破坏形式为腹板与暗柱结合区域产生竖向贯通裂缝。分析其原因,GTJ腹板和翼缘水平钢筋伸入暗柱,连接效果相对较好,节点构件整体性较好,有利于节点抗震。FGTJ在腹板与暗柱结合区域相对比较薄弱,缺少在水平方向上的必要连接。

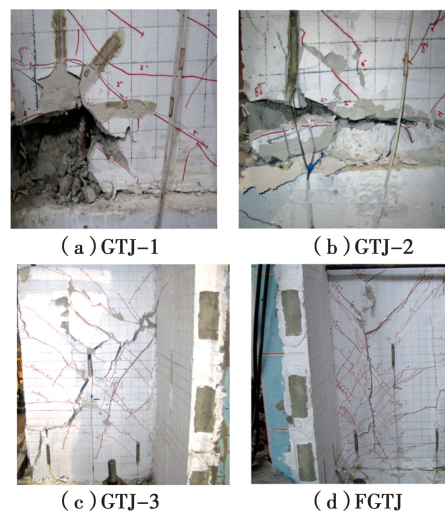


图7 试件破坏图

Fig. 7 Specimen destruction diagram

3 试验结果与分析

3.1 滞回及骨架曲线

滞回曲线常被用来评定复合剪力墙各类节点的抗震性能^[10],试件的滞回和骨架曲线见图8。在复合剪力墙腹板开裂之前,GTJ和FGTJ节点的承载及变形能力相对较小,滞回环基本保持重合。GTJ和FGTJ节点均处在弹性阶段,无残余变形,无刚度退化。随着荷载的继续增大,滞回环也逐步变得越来越饱满。通过观察GTJ和FGTJ节点滞回曲线的坐标轴,当千斤顶卸载完毕时,试件的变形却不能完全回归到零。因此,可以得出复合剪力墙节点已发生弹塑性变形,并且残余变形在累计。与此同时,刚度退化也越来越严重。从GTJ和FGTJ节点的滞回曲线整体上看,GTJ节点滞回曲线与FGTJ节点相比相对较饱满,而FGTJ节点由于后期腹板与节点核心区异性柱水平连接失效,滞回曲线捏拢现

象相对比较严重,也说明 GTJ 的耗能能力明显好于 FGTJ。

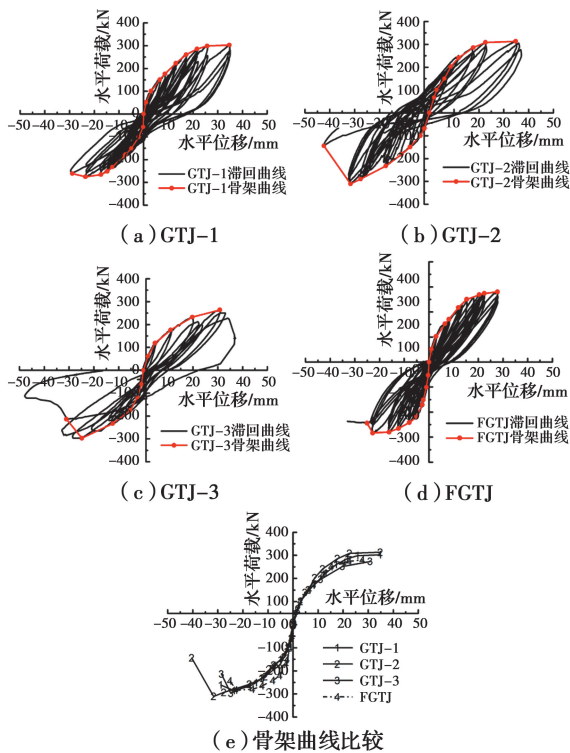


图 8 GTJ/FGTJ 滞回及骨架曲线图

Fig. 8 GTJ / FGTJ hysteresis and skeleton curve

GTJ 和 FGTJ 节点试件骨架曲线见图 8。在开裂前期,复合剪力墙节点的骨架曲线表现为直线状态,说明节点承载力与相应变形属于典型的线性变化关系。随着低周反复荷载的逐渐增大,腹板损伤累积越来越严重,骨架曲线逐渐由直线逐渐转变曲线形状。在 GTJ 和 FGTJ 节点屈服前,其荷载与位移间斜率基本一样,说明其刚度基本相同,即两类试件前期性能相同。当屈服以后,FGTJ 节点由于后期腹板与节点核心区异形柱水平连接逐渐失效,其刚度下降速度相对较快。从骨架曲线整体形状来看,GTJ 节点与 FGTJ 节点相比更高更长,说明 GTJ 承载及变形能力优于 FGTJ。从骨架曲线最终破坏情况来看,节点试件的承载能力突然丧失,主要表现为节点腹板发生脆性破坏,FGTJ 节点表现得更为明显,从节点破坏形态分析中同样能证实这一点。

3.2 承载及变形能力

GTJ 和 FGTJ 两类试件的主要试验结果见表 1,可以看出,GTJ 的开裂、屈服及极限荷载比 FGTJ 分别提高了 2.42%、10.84%及 9.25%,说明腹板水平钢筋伸入节点核心区有助于提高节点的承载能力,对开裂具有一定的延缓作用。从开裂、屈服及极

限位移对比来看,GTJ 节点比 FGTJ 节点分别提高了 16.42%、16.81%及 13.36%,说明 GTJ 节点的整体抗变形能力与 FGTJ 节点相比要好一些。其原因在于,GTJ 节点腹板与节点暗柱之间采用水平钢筋进行连接,组合节点的整体性相对较好,在加载过程中,承载及变形能力相对较好。FGTJ 节点的腹板与暗柱之间缺少必要的水平钢筋连接,导致腹板与节点暗柱过早分离,造成整体性较差。在腹板与暗柱之间连接界面容易产生竖向裂缝,随着荷载的增加,薄弱区的竖向裂缝不断增多和加宽,竖向裂缝逐渐贯通导致试件最终发生破坏。

表 1 承载力与变形

Table 1 Load capacity and deformation

试件 编号	$P_{cr}/$ kN	$\Delta_{cr}/$ mm	P_y/kN	$\Delta_y/$ mm	$P_u/$ kN	$\Delta_u/$ mm	μ
GTJ-1	97.01	3.02	176.08	8.63	302.71	34.72	4.02
GTJ-2	97.73	3.38	186.95	8.35	329.12	33.86	4.06
GTJ-2	93.13	3.17	175.03	8.04	297.25	25.85	3.22
GTJ _{平均}	95.96	3.19	179.35	8.34	309.69	31.48	3.76
FGTJ	93.69	2.74	161.81	7.14	283.46	27.77	3.41

位移延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ 可作为复合剪力墙节点抗震性能的评判指标^[11]。GTJ 和 FGTJ 节点的开裂荷载 P_{cr} 、屈服荷载 P_y 、极限荷载 P_u 、开裂位移 Δ_{cr} 、屈服位移 Δ_y 、极限位移 Δ_u 都根据试验规范建议的方法获得^[12]。GTJ 和 FGTJ 试件的延性系数分别为 3.76 和 3.41,提高了约 10.26%,表明 GTJ 节点的腹板水平钢筋伸入暗柱的连接方式有助于提高其延性。从 GTJ 和 FGTJ 节点破坏机理来看,均是由于腹板破坏而导致节点最终不能继续承受荷载而发生破坏。GTJ 表现为腹板脚部混凝土被压碎、钢筋发生屈服或者 45° 方向产生贯通的主裂缝;FGTJ 表现为腹板与暗柱连接处产生竖向贯通主裂缝。

3.3 刚度退化

复合剪力墙节点在试验过程中随着低周反复荷载的不断增加,刚度逐渐出现退化^[13]。为了使研究更具有代表性,选取 GTJ 和 FGTJ 节点各试件滞回曲线或骨架曲线上的关键点作为研究对象。将关键点纵横坐标比值作为 GTJ 和 FGTJ 的等效刚度 K ;将等效刚度 K 与初始刚度 K_0 的比值 K/K_0 规定为 GTJ 和 FGTJ 节点相对刚度。同理可得到相对位移

δ/δ_u 。GTJ 和 FG TJ 节点的刚度退化曲线见图 9,刚度在整个受力过程中逐渐减小,表明在低周反复荷载作用下,裂缝继续增多并加宽,损伤进一步累积。从刚度退化速度的角度分析,FG TJ 比 GTJ 刚度退化快。尤其是当进入弹塑性阶段之后,退化速度相对更快。在 FG TJ 节点的腹板与暗柱结合处竖向主裂缝的形成和发展是导致刚度下降的直接原因,表明腹板水平钢筋伸入暗柱并贯通节点,形成有效地连接,有利于提高 GTJ 节点整体抗侧刚度,有利于提高其抗震性能。

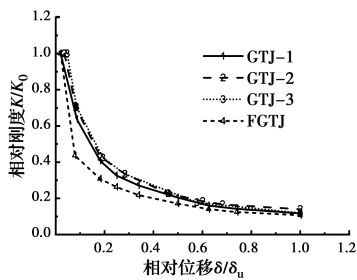


图 9 GTJ 和 FG TJ 刚度退化曲线

Fig. 9 GTJ and FG TJ stiffness degradation curves

3.4 耗能能力

普通混凝土异型柱具有较好的力学性能,但暗柱与内外两类复合剪力墙组合后的性能需要在模拟地震作用下对其进行耗能分析。滞回环所包围的面积 $S_{ABC+CDA}$ 越饱满,表明其耗能能力就越强。抗震滞回环耗能示意图见图 10,所围成的有效面积 $S_{BEO+DFO}$ 表示 GTJ 和 FG TJ 节点在一次循环荷载作用下所消耗的总能量。能量耗散系数 $E = S_{ABC+CDA} / S_{BEO+DFO}$ 。GTJ 和 FG TJ 在 $1\Delta_y$ 、 $2\Delta_y$ 、 $3\Delta_y$ 所对应的 E 分别为 0.44、0.50、0.75 和 0.38、0.57、0.69。极值荷载状态下,GTJ 能量耗散系数提高了 8.70%。由此可见,能量耗散系数 E 随着位移的增加而逐渐增大,GTJ 与 FG TJ 相比更有利于抗震。

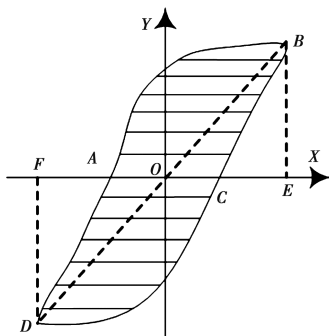


图 10 滞回环耗能示意图

Fig. 10 Hysteresis loop energy consumption diagram

4 结论

1)通过对 GTJ 和 FG TJ 两类连接节点进行抗震性能试验对比分析,得到两类节点的各阶段裂缝主要集中在腹板的两侧,翼缘变化不明显。GTJ 节点在其腹板脚部混凝土被压碎、钢筋发生屈服或者 45° 方向产生贯通的主裂缝而最终破坏。FG TJ 节点在其腹板与暗柱连接处产生竖向的贯通主裂缝而最终破坏。

2)通过对 GTJ 和 FG TJ 节点承载及变形能力、滞回特性、延性、刚度退化、耗能等性能进行分析,发现 GTJ 抗震性能优越于 FG TJ 试件,表明预制装配式复合剪力墙节点暗柱与复合剪力墙之间连接方式不同,其组合节点的整体性能也不同,说明水平钢筋对复合剪力墙节点进行可靠地连接能有效地提高其抗震性能。

3)通过对位移延性系数进行分析发现,GTJ 试件的位移延性系数 3.76 与 FG TJ 试件的位移延性系数 3.41 相比提高了 10.26%,说明 GTJ 节点的腹板水平钢筋伸入暗柱形成可靠的连接可以提高其延性。通过耗能分析发现,GTJ 和 FG TJ 在 $1\Delta_y$ 、 $2\Delta_y$ 、 $3\Delta_y$ 所对应的能量耗散系数 E 分别为 0.44、0.50、0.75 和 0.38、0.57、0.69,并且随着位移的不断增加而逐渐增大。从节点整体抗震性能来看,GTJ 节点的耗能能力相对优于 FG TJ 节点。

参考文献:

[1] 周绪红,王宇航.我国钢结构住宅产业化发展的现状、问题与对策[J].土木工程学报,2019,52(1):1-7.
ZHOU X H, WANG Y H. Status, problems and countermeasures of industrialization development of steel structural residence in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(1): 1-7. (in Chinese)

[2] 杨伟,王爽,顾东杰,等.严寒地区夏季墙体周期性自然对流传热研究[J].武汉大学学报(工学版),2020,53(2):117-122.
YANG W, WANG S, GU D J, et al. Study on periodic natural convective heat transfer in the wall in severe cold region in summer season [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(2): 117-122. (in Chinese)

[3] MA S C, JIANG N. Experimental investigation on the seismic behavior of a new-type composite interior

- wallboard [J]. *Materials and Structures*, 2016, 49 (12): 5085-5095.
- [4] ABDEN M J, TAO Z, PAN Z, et al. Inclusion of methyl stearate/diatomite composite in gypsum board ceiling for building energy conservation [J]. *Applied Energy*, 2020, 259: 114113.
- [5] DIAS Y, KEERTHAN P, MAHENDRAN M. Fire performance of steel and plasterboard sheathed non-load bearing LSF walls [J]. *Fire Safety Journal*, 2019, 103: 1-18.
- [6] LEE A D, SHEPHERD P, EVERNDEN M C, et al. Optimizing the architectural layouts and technical specifications of curtain walls to minimize use of aluminium [J]. *Structures*, 2018, 13: 8-25.
- [7] 刘立平, 余杰, 廖东峰, 等. 纵筋合并连接的装配式钢筋混凝土剪力墙平面内受力性能[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(6): 135-142.
- LIU L P, YU J, LIAO D F, et al. In-plane mechanical properties of assembled reinforced concrete shear walls with longitudinal reinforcements combined by connecting rebars [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(6): 135-142. (in Chinese)
- [8] MA S C, BAO P, JIANG N. Experimental study of gypsum-concrete dense-column composite boards with external thermal insulation systems [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(6): 1976.
- [9] 张爱林, 上官广浩, 张艳霞, 等. 带中间柱摩擦阻尼器的装配式自复位钢框架拟动力试验[J/OL]. *建筑结构学报*. <https://DOI.org/10.14006/j.jzjgxb.2019.0743>.
- ZHANG A L, SHANGGUAN G H, ZHANG Y X, et al. Pseudo dynamic tests on prefabricated self-centering steel frame with intermediate columns containing friction dampers [J]. *Journal of Building Structures*. <https://DOI.org/10.14006/j.jzjgxb.2019.0743>.
- [10] 初明进, 刘继良, 侯建群, 等. 带竖向接缝的空心模剪力墙受剪性能试验研究及承载力计算[J]. *工程力学*, 2020, 37(1): 183-194.
- CHU M J, LIU J L, HOU J Q, et al. Experimental study on shear behaviors and bearing capacity of shear walls built with precast concrete two-way hollow slabs with vertical joints [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(1): 183-194. (in Chinese)
- [11] 陈宗平, 梁厚燃. 高温喷水冷却后钢筋再生混凝土梁受力性能试验及承载力计算[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(12): 22-35.
- CHEN Z P, LIANG H R. Mechanical behavior test and bearing capacity calculation of reinforced recycled concrete beam subjected to high temperature and subsequent water cooling [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(12): 22-35. (in Chinese)
- [12] 建筑抗震试验方法规程: JGJ 101—1996 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- Specifying of testing methods for earthquake resistant building: JGJ 101-1996 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese)
- [13] 吕文, 钱稼茹, 方鄂华. 钢筋混凝土剪力墙延性的试验和计算[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1999, 39(4): 88-91.
- LV W, QIAN J R, FANG E H. Experimental and computational studies on ductility of reinforced concrete shear walls [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1999, 39(4): 88-91. (in Chinese)

(编辑 章润红)