

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221208004

# 一种新型结构与保温一体化复合墙板节点试验\*

马少春<sup>1,2</sup>, 谷宇<sup>1</sup>, 鲍鹏<sup>1,2</sup>

(1. 河南大学土木建筑学院, 河南 开封 475004;  
2. 河南大学开封市工程修复与材料循环工程技术研究中心, 河南 开封 475004)

**摘要:**为解决复合墙板节点常见的保温板易燃、易脱落等棘手问题,并使其抗震性能良好。给出了一种新型的结构与保温一体化陶粒混凝土T型复合墙板节点。该复合墙板节点具有夹芯独特构造优势,主要表现在绿色节能,轻质高强,力学性能好,保温系统连接可靠,还能杜绝火灾的发生。通过对T型复合墙板节点进行抗震试验,分别研究了其滞回性能、破坏机理、承载及变形能力、延性、耗能、损伤等。结果表明:一体化复合墙板节点的破坏顺序为腹板-翼缘-节点核心区;薄弱位置主要发生在腹板脚部,混凝土被拉裂或压碎,钢筋被拉长或压弯等;节点核心区受力相对良好,安全储备充足;符合“强节点,弱构件”设计要求和墙板革新政策。延性系数大于3,墙板节点安全性能良好。通过损伤指标评估分析,了解了试件各阶段工作状态。

**关键词:** 结构与保温一体化; 复合墙板节点; 抗震试验; 滞回及骨架曲线; 损伤指标

**中图分类号:** TU375.2; TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2024)02-0396-08

## Experimental Study on a New Type of Composite Wall Panel Joint Integrating Load Bearing and Thermal Insulation

MA Shaochun<sup>1,2</sup>, GU Yu<sup>1</sup>, BAO Peng<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China;  
2. Kaifeng Research Center for Engineering Repair and Material Recycle, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** In order to address common issues with composite wall panel joints, such as the inflammability and easy detachment of insulation boards, while ensuring their seismic performance, a new type of ceramsite concrete T-shaped composite wall panel joints integrating load-bearing capabilities with thermal insulation was presented. The joints featured a unique sandwich-structured construction that offered several advantages. They were eco-friendly and energy-efficient, lightweight but strong, with good mechanical properties and a reliable insulation system connection. They could also prevent fires. The hysteresis behavior, failure mechanisms, load bearing and deformation capacities, ductility, energy dissipation, and damage of the T-shaped composite wall panel joints were studied through seismic tests. The results showed that the sequence of damage in the integrated composite wall panel joints was from the web, to the flange, and finally to the core area of the joint. Areas of weakness mainly occurred at the foot of the web, where the concrete was cracked or crushed and the reinforced bars were stretched or bent. The joint core area demonstrated strong resilience with ample safety margins. The joints were in line with the design requirements of "strong joints, weak components" and policies for

\* 收稿日期:2022-12-08;修回日期:2023-02-20

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(2018M632805)、河南省科技攻关项目(212102310932)资助

作者简介:马少春(1982—),男,副教授,硕导,博士。主要从事装配式建筑及工程抗震研究。E-mail:scma@vip.henu.edu.cn

wall panel innovation. With a ductility coefficient greater than 3, the safety performance of the joints was good. Through the damage index assessment, the working states of the specimens at each stage were identified.

**Keywords:** load bearing and insulation integration; composite wall panel joint node; seismic test; hysteresis and skeleton curve; damage index

## 0 引言

我国城乡建设在经历了从起步到快速发展两个阶段后,逐渐进入以提升质量及绿色发展为主的转型发展新阶段。传统现浇剪力墙板存在生产耗能大,施工效率低,施工污染大以及劳动需求密集等突出问题,难以适应城乡建设绿色发展趋势和要求。而绿色建材的推广应用及新型复合墙板结构的研发从设计、生产到施工全周期推动了城乡建设持续健康发展,符合我国十四五发展规划要求。

轻骨料混凝土一般能降低20%~40%材料自重和10%~20%工程造价,还能表现出良好的耗能能力<sup>[1-2]</sup>。陶粒混凝土具有轻质、高强、低碳环保等优点,近年来被广泛地研究与应用<sup>[3]</sup>。常规的外墙外保温墙板由于刚度分布不均,在实际工程中大量外墙板出现开裂,导致保温材料、连接件及建筑外饰面受损或脱落<sup>[4-5]</sup>。为解决该棘手问题,本文提出了一种新型的结构与保温一体化复合墙板节点。受力部件主要采用陶粒混凝土内外墙页,B1级保温板内置在内外墙页之间。在垂直或水平方向上墙体刚度相对较为均匀,避免了由于受力不均而导致墙板局部开裂或保温板脱落等弊端<sup>[6]</sup>。

通过调研发现,现阶段研究大多数都是针对于墙板构件本身,各墙板部件在装配后的整体组合节点受力性能等方面的研究相对较少。在地震作用下,节点部位受力及变形复杂,若节点部位成为薄弱点并破坏,将直接威胁到整体结构的稳定性和安全性<sup>[7]</sup>。研究表明,在节点部位采用连接筋深入节点核心区可提高节点整体承载及变形能力,避免出现脆性破坏等<sup>[8-9]</sup>。本文共设计了三个新型结构与保温一体化T型复合墙板节点试件,符合为我国墙板革新及发展政策,也符合“强节点,弱构件”设计要求。通过低周反复荷载试验研究了该类墙板节点试件的滞回性能、破坏机理、承载及变形能力、延性、耗能、损伤等抗震指标。试验结果可以丰富该类复合墙板节点研究成果,为该类结构与保温一体化复合墙板节点的推广和应用提供重要参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

本试验共设计3个新型结构与保温一体化T型复合墙板节点试件,编号依次为PT-1、PT-2、PT-3。复合墙板翼缘和腹板部分采用强度等级为LC20轻骨料陶粒混凝土进行浇筑,中间保温层采用B1级聚苯保温板。依据《民用建筑热工设计规范》<sup>[10]</sup>计算获得该试件传热系数 $K=0.684\ 039$ ,符合我国热工设计要求,计算公式如式(1)和式(2)所示。试件上部加载梁、节点核心区暗柱、底部固定梁采用混凝土强度等级为C30普通混凝土。墙板节点采用直径分别为8、12、16、20 mm的HRB400级热轧带肋钢筋。试件基本形状、尺寸及配筋情况如图1和图2所示,各部位材料情况见表1。

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (1)$$

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (2)$$

式中, $R$ 为材料层的热阻; $\delta$ 为材料层的厚度; $K$ 为传热系数。

试件由两片75 mm厚陶粒混凝土内外页墙、50 mm厚B1级聚苯保温板、纵横向钢筋、拉结筋以及加载梁和底部固定梁组成。试件高度根据实际建筑层高反弯点位置1/2处进行确定,影响相对较小。试件总高度1 900 mm,墙板厚度200 mm。通过在保温板表面进行开槽和打毛处理,改变其构造形式,见图3。另外,通过拉结钢筋、固定件及浇筑混凝土使之形成一体化整体结构,保证了不同材料之间的有效连接和协同工作。主要受力钢筋由直径为12 mm的U型水平筋及竖向受力纵筋组成。在节点核心区形成刚度相对较大的暗柱。为保证内外页墙、保温板等相对位置及相互协同工作,实现试件具有良好整体性的目的,在试件两片页墙之间设置了直径为8 mm的拉结钢筋。

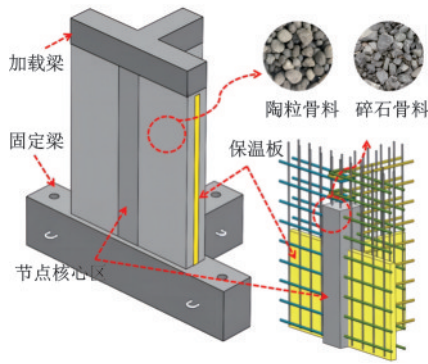


图1 试件三维模型示意

Fig.1 Schematic 3D model of the specimen

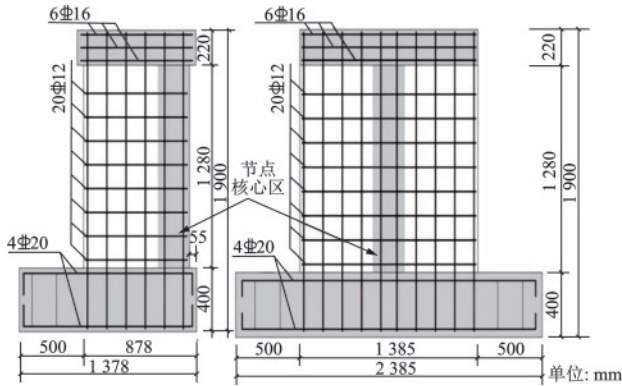


图2 试件配筋示意

Fig.2 Reinforcement schematic of the specimen

表1 各部位材料

Table 1 Materials for each part

| 材料         | 导热系数/<br>$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ | 比热容/<br>$kJ \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}$ | 使用部位       |
|------------|-------------------------------------|---|------------|
| LC20 陶粒混凝土 | 0.7                                 | 1.05  | 腹板、翼缘      |
| C30 普通混凝土  | 1.12                                | 0.97  | 暗柱、加载梁、固定梁 |
| 钢筋         | 19.9                                | 0.48  | 试件配筋       |
| 聚苯板        | 0.042                               | 1.38  | 内保温板       |



图3 保温板及配筋

Fig.3 Insulation board and reinforcement

## 1.2 材料性能

试件浇筑制作过程中,依据规范<sup>[11]</sup>预留陶粒混凝土及普通混凝土试块各一组,每组3块,分别进行立方体抗压强度试验,试验结果如表2所示。钢筋实测屈服强度 $f_{y,m}$ 、抗拉极限强度 $f_{u,m}$ 、总伸长率 $A_{gt}$ 以及断面收缩率 $Z$ 等见表3。

表2 混凝土材料性能

Table 2 Mechanical properties of concrete

| 材料类型  | 试块尺寸/<br>mm | 立方体抗压强度<br>平均值/MPa | 弹性模量/<br>$\times 10^5$ MPa |
|-------|-------------|--------------------|----------------------------|
| 普通混凝土 | 100×100×100 | 37.1               | 3.18                       |
| 陶粒混凝土 | 100×100×100 | 22.8               | 2.21                       |

表3 钢筋材料性能

Table 3 Mechanical properties of reinforced bars

| 钢筋直径/mm | $f_{y,m}$ /MPa | $f_{u,m}$ /MPa | $Z$ /% | $A_{gt}$ /% | 强屈比  |
|---------|----------------|----------------|--------|-------------|------|
| 8       | 463.8          | 645.0          | -53.57 | 23.4        | 1.39 |
| 12      | 460.5          | 590.5          | -52.41 | 22.3        | 1.28 |
| 16      | 471.0          | 610.5          | -51.84 | 22.5        | 1.29 |
| 20      | 463.1          | 586.2          | -50.42 | 22.3        | 1.28 |

## 1.3 加载及测量方案

试件加载装置如图4所示,通过地锚螺栓及钢梁将试件固定在刚性地面上。为模拟试件的真实受力工况,主要通过水平和竖直两个方向分别进行加载。

为了模拟试件上部传下来的竖向荷载情况,依据实际3层楼建筑进行计算获得。竖直方向施加316 kN恒载,轴压比为0.08。恒载通过液压千斤顶

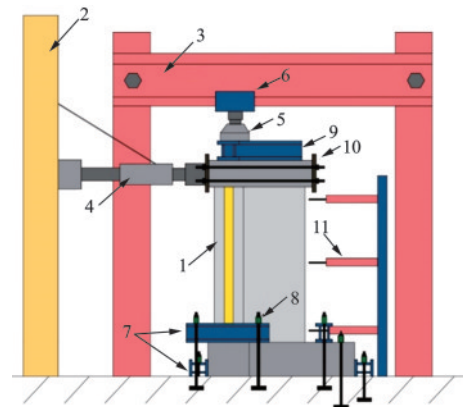


图4 试验加载装置

Fig.4 Test setup

注: 1. 试件; 2. 反力墙; 3. 反力架; 4. 水平作动器; 5. 千斤顶; 6. 滑动支座; 7. 固定梁; 8. 固定螺栓; 9. 分配梁; 10. 加载梁; 11. 位移计

施加在节点试件顶部分配钢梁上。其刚度相对较大,使荷载能够均匀传递给节点试件顶部,避免应力集中影响。在液压千斤顶顶部设置滚轴支座来实现试件受恒载时能够随节点试件在水平方向上同步移动。依据规范,恒载施加时先施加满载的40%,再逐步加至满载<sup>[12]</sup>。

水平方向在节点试件腹板顶部一侧设置1台推拉千斤顶模拟水平地震作用。推拉千斤顶一端固定于反力墙,另一端通过传感器、固定件与试件连接。依据规范,在正式加载前取预估30%开裂荷载进行预加载。采用荷载与位移控制混合加载方式进行加载。在试件开裂前采用荷载加载,试件开裂后采用位移控制加载,直到试件承载力下降至峰值的85%以下,试件破坏,试验结束,试件的加载控制曲线如图5所示。

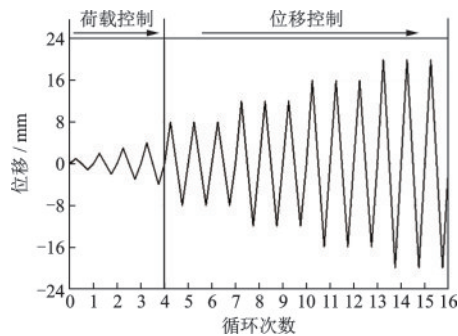


图5 试验加载制度  
Fig.5 Loading procedures

为消除试验误差,在试件前端分别布置3个自复位式位移计与推拉千斤顶的电液伺服加载系统自带位移计测试结果形成对比,在试件固定梁上同时也布置位移计,检验在试验过程中是否发生相对移动。在钢筋和混凝土中分别布置胶基和纸基应变片进行应变测量。为了准确测量裂缝开展情况,在试件上用墨线弹出50 mm×50 mm网格来确定开裂位置,并量测裂缝产生的长度和宽度。本文提出的新型节点试件与普通的夹芯墙板相比,连接相对更加可靠,对试件的整体抗震性能有利,裂缝产生也相对较晚。

## 2 试验现象及破坏过程

3个试件破坏过程及形态相似,在前三个循环中无明显试验现象,试件基本处于弹性阶段;在加载第四个循环中,在正向加载过程中腹板底部高约

35 cm处出现长约12 cm水平裂缝。受拉导致腹板边缘陶粒混凝土先达到开裂应变,试件进入开裂阶段;当加载到第六个循环,位移加载到12 mm时,距离底部45 cm的腹板中部出现三条45°斜裂缝,长19~21cm,斜裂缝的产生表示试件受到剪切作用,符合剪力墙的受力特点;随着荷载继续加大,翼缘也产生水平裂缝,腹板的水平裂缝和斜裂缝不断发展交叉,并有向腹板裂缝发展的趋势;当加载到第八次循环,腹板脚部混凝土出现裂缝,试件已进入屈服阶段。现有裂缝快速发展且无新裂缝产生,力-位移曲线逐渐接近峰值;第十二个循环时,翼缘混凝土出现剪切斜裂缝,腹板脚部混凝土被压碎,试件最外侧钢筋屈服,正向达到0.85倍峰值荷载,试件破坏。当进行到第十四个循环时,负向荷载接近峰值荷载0.85倍,试件发生较大变形而严重破坏,试验结束,破坏情况如图6所示。

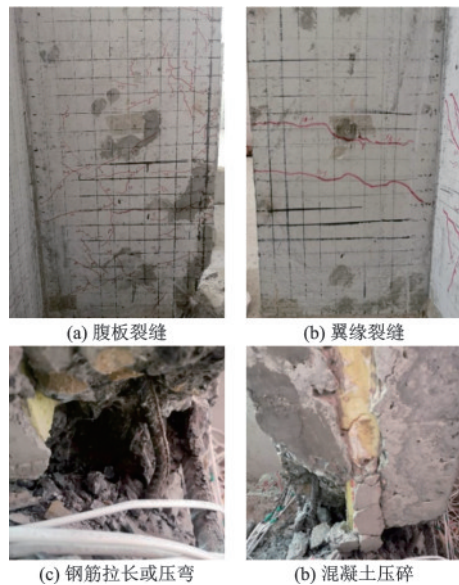


图6 试件破坏  
Fig.6 Failure mechanisms of the specimens

## 3 试验结果分析

### 3.1 滞回及骨架曲线

滞回曲线能较好地反映出墙板节点试件的抗震性能<sup>[13]</sup>,三个试件滞回及骨架曲线如图7所示。在加载初期,滞回环基本保持为线性,试件处于弹性阶段且无残余变形;在加载至第四个循环时,试件位移达到4 mm,在正向受拉过程中腹板两面距

底部约 35 mm 处和 40 mm 处分别出现 12 cm 和 9 mm 的初始水平裂缝,试件开裂。试件腹板两侧混凝土基本达到了材料的极限拉应变。此时,试件侧面保温板位置相对完好。而普通夹芯墙板由于

中间连接相对薄弱,在保温板与混凝土连接区域优先产生裂缝。原因分析:本文采用等厚的内外页板、在保温板表面进行了开槽和留痕、配置了双排钢筋,还采用了拉结筋进行加强连接等方式,构造设计提高了试件的整体受力性能,延缓了试件开裂。随着滞回环面积逐渐增加,产生残余变形和刚度退化;随着加载继续增大,试件进入屈服阶段,滞回环逐渐饱满,残余变形逐渐累积。与此同时,刚度退化更加显著;当达到峰值荷载后,滞回环呈反 S 型发展,滞回环捏拢现象逐渐明显。在达到峰值荷载前,滞回环反映出较少的捏拢和滑移现象,说明本文提出的新型结构与保温一体化 T 型复合墙板节点试件,在节点核心区采用 U 型配筋形式并形成刚度较大的节点暗柱,增强节点暗柱与墙板翼缘及腹板的协同工作能力效果显著。

通过对图 7(d)各试件骨架曲线进行对比分析可得其骨架曲线整体趋势一致。试件在开裂前骨架曲线成典型的线性关系;随着裂缝的增多及变宽或加长,节点试件的腹板及翼缘产生了损伤累积。骨架曲线逐渐由直线转变为曲线,斜率也逐渐减小了。裂缝的不断出现和进一步发展降低了试件的刚度和承载能力。随着加载的继续增大,试件在正方向上率先达到荷载峰值后进入破坏阶段,位移变化在增速,而承载能力在下降。腹板脚部混凝土被压碎及钢筋被屈服,试件整体表现为延性破坏。试件在整个加载过程中,腹板为受力变形的敏感部位,翼缘次之,而节点核心区并未发生破坏,证实了该构件的确满足“强节点,弱构件”设计原则,具有较好的应用前景。

### 3.2 节点钢筋-混凝土应变分析

为了解节点试件关键受力区域不同材料变形规律,所选用的应变片为试件腹板下部外侧关键区域的纵向受力钢筋应变片(G10)和相同区域的(H14)号混凝土应变片,如图 8 所示。

在加载初期,钢筋和混凝土应变基本保持同步。随着荷载的不断增大,试件逐渐进入开裂阶段。由于粘结滑移使钢筋-混凝土出现了应变差,并不断加大,在试件屈服后趋于稳定。通过对曲线整体分析来看,试件的拉应变均大于压应变。这是由于试件的腹板与翼缘等部位不对称造成的,这与试件的滞回曲线和骨架曲线得出的结论基本一致。

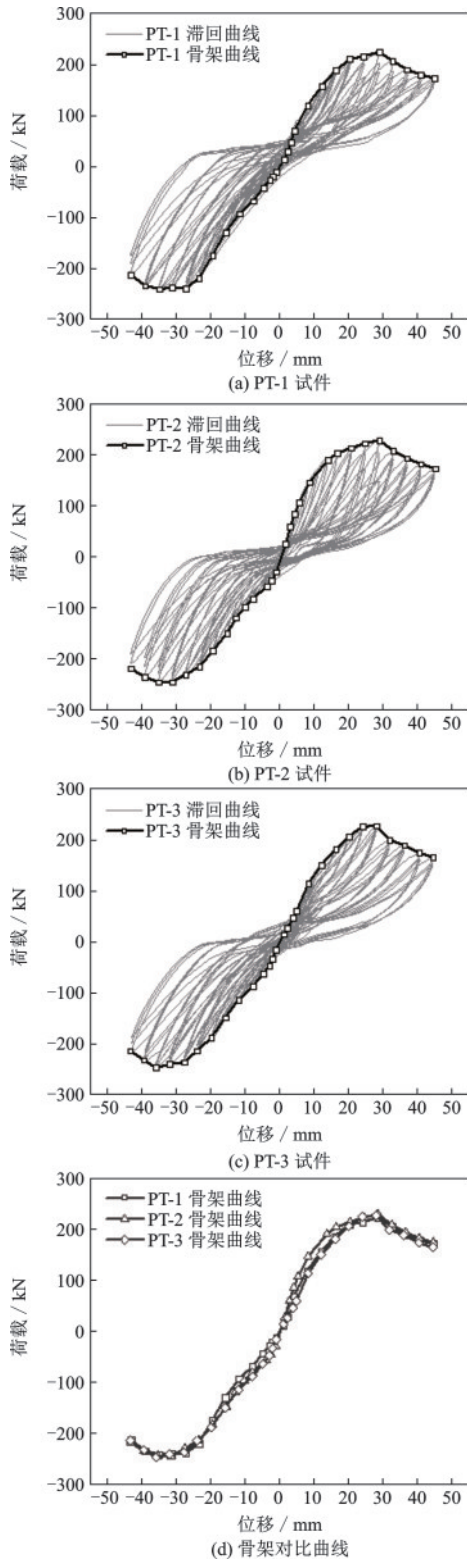


图 7 滞回及骨架曲线

Fig.7 Hysteresis and skeleton curves

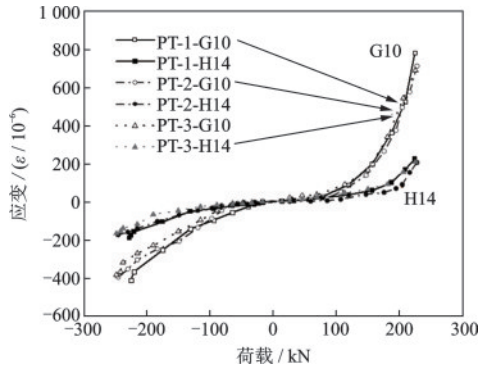


图8 钢筋及混凝土应变曲线

Fig.8 Strain curves of reinforced bars and concrete

### 3.3 承载及变形能力

根据《高层混凝土结构技术规程》<sup>[12]</sup>中规定墙板节点的受剪承载力计算公式(3),得到在地震作用下该构件的理论承载力为207.934 kN。各试件的主要试验结果见表4,可以得出该类墙板节点的试验值高于理论计算值的8%~19%,可见,具有足够的抗震能力储备,偏安全。

$$V \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} \left[ \frac{1}{\lambda - 0.5} \left( 0.4f_t b_w h_{w0} + 0.1N \frac{A_w}{A} \right) + 0.8f_{y,m} \frac{A_{sh}}{s} h_{w0} \right] \quad (3)$$

通过采用作图法计算试件的屈服位移,如图9所示,处理结果见表4。通过对表4试验结果关键参数对比分析发现,该墙板节点开裂荷载与屈服荷载的比值范围在2.16~3.09。极限荷载与屈服荷载比值范围在1.28~1.36,后者约为前者0.5倍,可以得出开裂-屈服-峰值呈非线性增长。当进入屈服阶段后,承载力增加速度明显低于变形增加速度;试件屈服位移角均值为1/135,极限位移角均值为1/47,后者与前者之比接近为3倍的关系,同样得出一致的结论。此外,试件的变形性能可用位移延性系数 $\mu$ ( $\mu = \delta d / \delta y$ )来表示<sup>[14]</sup>,该墙板节点的延性系数均值为3.01。构件的强度和延性是保证结构安全的基本前提,分析结果表明:该类试件后期的变形能力相对较强,延性较好,对试件抗震性能有利。

### 3.4 刚度退化

刚度大小是体现构件或结构抵抗变形的能力强弱,也是评判其抗震性能好坏的重要指标之一。在低周反复荷载作用下,墙板节点刚度逐渐发生退化<sup>[15]</sup>。通过对图10进行比较发现,三个试件刚度退化趋势基本相同,表现出先快后慢的发展规律。试

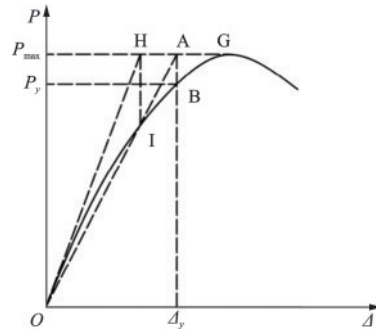


图9 屈服点计算方法

Fig.9 Yield point calculation method

表4 试验结果关键参数

Table 4 Key parameters of test results

| 特征点               | 试件 PT-1 |        | 试件 PT-2 |        | 试件 PT-3 |        |
|-------------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|                   | 正向      | 负向     | 正向      | 负向     | 正向      | 负向     |
| $P_{cr}$ /kN      | 68.79   | 59.21  | 72.51   | 67.24  | 78.24   | 65.43  |
| $\Delta_{cr}$ /mm | 3.87    | 4.03   | 3.97    | 4.26   | 4.07    | 4.12   |
| $P_y$ /kN         | 172.63  | 183.42 | 176.87  | 192.15 | 169.44  | 182.36 |
| $\Delta_y$ /mm    | 12.13   | 15.76  | 11.92   | 16.32  | 12.09   | 16.07  |
| $P_p$ /kN         | 223.46  | 242.21 | 230.16  | 245.78 | 227.4   | 248.62 |
| $\Delta_p$ /mm    | 27.92   | 35.69  | 28.52   | 35.72  | 28.04   | 36.01  |
| $P_u$ /kN         | 189.94  | 215.48 | 195.64  | 219.26 | 193.29  | 214.67 |
| $\Delta_u$ /mm    | 36.46   | 43.27  | 35.94   | 43.46  | 36.37   | 43.52  |
| $\theta_u$        | 1/68    | 1/53   | 1/67    | 1/53   | 1/68    | 1/52   |
| $\mu$             | 3.06    | 2.75   | 3.02    | 2.67   | 3.01    | 2.71   |

注: $P_{cr}$ 和 $\Delta_{cr}$ 表示开裂荷载和位移; $P_y$ 和 $\Delta_y$ 表示屈服荷载和位移; $P_p$ 和 $\Delta_p$ 表示峰值荷载和位移; $P_u$ 和 $\Delta_u$ 表示破坏荷载和位移

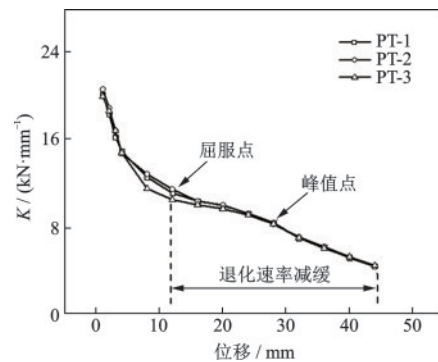


图10 刚度退化曲线

Fig.10 Stiffness degradation curves

件在屈服前,新裂缝不断出现并发展,刚度退化较快。试件在屈服后,几乎无新裂缝产生,刚度退化相对缓慢。墙板节点核心区部位基本无裂缝产生,说明在低周反复荷载作用下,腹板和翼缘损伤累积是影响试件整体刚度下降的主要根源。

### 3.5 耗能能力

墙板节点构件在弹塑性阶段的抗震性能取决

于其耗能能力,通常多采用粘滞阻尼系数 $E$ 衡量,其值越大则表明墙板节点耗能能力就越强<sup>[16-17]</sup>。由表5分析可知,随着变形不断增加,粘滞阻尼系数 $E$ 逐渐增大,耗能能力逐渐增强,符合抗震耗能规律。

在1倍屈服位移到2倍屈服位移之间,粘滞阻尼系数由0.04增至0.12。此阶段为墙板节点处于裂缝快速发展阶段,粘滞阻尼系数增加幅度相对较大,表明在裂缝发展阶段试件耗能性能效果显著。当达到2倍屈服位移后,试件接近荷载峰值,耗能由0.12增至0.15,增速相对放缓,主要是由于试件损伤不断累积的结果。

表5 粘滞阻尼系数 $E$

| Table 5 Adhesion damping coefficient |             |             |             |
|--------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 试件编号                                 | $1\Delta_y$ | $2\Delta_y$ | $3\Delta_y$ |
| PT-1                                 | 0.040 0     | 0.120 4     | 0.146 6     |
| PT-2                                 | 0.042 6     | 0.126 5     | 0.153 1     |
| PT-3                                 | 0.039 2     | 0.123 4     | 0.153 1     |

### 3.6 损伤指标分析

地震破坏形式主要呈现为首次超越破坏和累计损伤破坏的叠加。为使损伤实现量化, Park等<sup>[18]</sup>学者基于大量混凝土结构试验结果进行回归分析,提出了基于最大反应变形和耗能项进行线性组合的双参数破坏模型。该模型能较好地评估构件损伤,由于形式简洁,效果显著,能够被广泛应用于实际工程。Park双参数损伤计算公式如公式(4)所示。通过对本文提出的结构与保温一体化墙板节点各试件的试验结果进行处理和分析,获得其损伤指标结果如图11及表6所示。

$$D = \frac{\delta_M}{\delta_U} + \beta \frac{\int dE}{Q_Y \delta_U} \quad (4)$$

式中, $\delta_M$ 、 $\delta_U$ 为试件变形与极限变形, $\beta$ 为耗能因子, $Q_Y$ 为试件屈服荷载; $\int dE$ 为试件耗能。

在墙板节点屈服前,试件损伤指标相对较低,耗能低,此阶段损伤主要由变形控制。在试件屈服后,试件变形与耗能能力有大幅增加,损伤发展迅速。当达到峰值荷载后,逐步过度到破坏阶段。当试件损伤指标接近1.0时,抗震性能可恢复性相对困难<sup>[19]</sup>。通过图11各试件损伤指标发展趋势,结合试验破坏现象综合分析可知,当试件损伤值小于0.1时,处于准弹性状态,对应于三水准设防标准中“小震不坏”;当试件损伤值在0.1~0.3时,处于轻微破坏,对应于“中震可修”;但试件损伤值为0.3~0.8时,试件破坏严重,对应三水准中大震阶段;随着荷

载增大,损伤累计达到1以上,认为试件破坏。通过损伤分析能综合反映出试件抗震性能工作全过程,补充和丰富了评估墙板节点抗震性能指标。

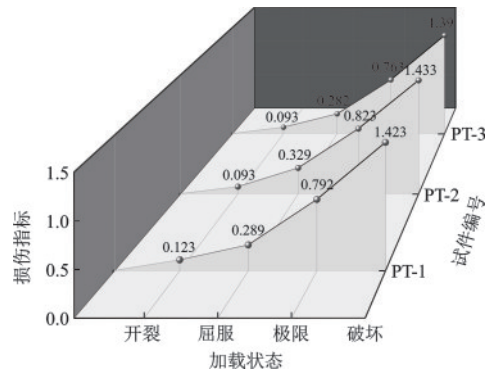


图11 损伤发展趋势

Fig.11 Damage progression

表6 试件损伤指标

Table 6 Damage indicators of the specimens

| 编号   | 试件状态 | 损伤指标     |
|------|------|----------|
| PT-1 | 开裂   | 0.122 89 |
|      | 屈服   | 0.289 23 |
|      | 极限   | 0.791 96 |
|      | 破坏   | 1.422 95 |
| PT-2 | 开裂   | 0.093 12 |
|      | 屈服   | 0.328 57 |
|      | 极限   | 0.823 03 |
|      | 破坏   | 1.432 71 |
| PT-3 | 开裂   | 0.093 37 |
|      | 屈服   | 0.282 41 |
|      | 极限   | 0.762 94 |
|      | 破坏   | 1.389 78 |

## 4 结论

(1) 给出了一种新型的结构与保温一体化陶粒混凝土复合墙板节点,改善及解决了外保温板易燃易脱落等问题。根据墙板节点各项抗震性能指标分析结果,得出墙板节点具有良好的抗震性能。

(2) 节点核心区采用U型配筋能够较好地限制试件滑移现象。在节点核心区域形成了矩形加强暗柱,提高了试件整体抗震性能,节点核心区安全储备充足,符合“强节点,弱构件”设计原则。

(3) 通过对该类墙板节点的滞回、骨架、延性、承载及变形、耗能、损伤等指标进行分析可得,墙板节点强度试验值高于理论计算值的8%~19%,强度储备充足;极限位移角与屈服位移角之比接近3倍,后期变形性能相对较强;随着荷载增加,耗能能

力逐步加强,延性较好,抗震性能优越。

(4) 通过 Park-Ang 双参数地震损伤模型可以综合地反映出试件各阶段工作状态。屈服前,试件损伤由变形引起;屈服后,变形与耗能对损伤起主导作用。由损伤指标显示可知,试件在破坏时已达到 1.4,损伤程度较严重。

## 参考文献:

- [1] Wongkvanklom A, Posi P, Khotsopha B, et al. Structural lightweight concrete containing recycled lightweight concrete aggregate [J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2018, 22(8): 3077-3084.
- [2] 张爱林,朱涛,刘学春.外包陶粒混凝土 H 型钢梁受弯性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42(4): 80-91. Zhang A L, Zhu T, Liu X C. Study on flexural performance of H-shaped steel beam wrapped with ceramsite concrete [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(4): 80-91. (in Chinese)
- [3] 李辛庚,闫风洁,岳雪涛,等.陶粒混凝土的研究进展 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(11): 3407-3418, 3452. Li X G, Yan F J, Yue X T, et al. Research progress on ceramsite concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(11): 3407-3418, 3452. (in Chinese)
- [4] Farahani J N, Shafiqh P, Alsubari B, et al. Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing binary and ternary blended cement [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 149: 976-988.
- [5] 何之舟,潘鹏,王海深.夹心保温墙体 GFRP 连接件轴向性能研究 [J]. 工程力学, 2021, 38(3): 112-121. He Z Z, Pan P, Wang H S. Axial performances of a GFRP connector for sandwich insulation wall panels [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(3): 112-121. (in Chinese)
- [6] Ma S C, Hou D F, Bao P, et al. Influence of alkali-resistant glass fiber on seismic performance of precast ceramsite concrete sandwich wall panels [J]. Structures, 2022, 38: 94-107.
- [7] 张健新,赵茜娅,丁传林,等.高强钢筋钢纤维混凝土框架中节点抗震性能试验研究 [J]. 应用力学学报, 2022, 39(4): 707-716. Zhang J X, Zhao X Y, Ding C L, et al. Experimental research on seismic behavior of frame interior joints with high strength reinforcing bars and steel fiber concrete [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(4): 707-716. (in Chinese)
- [8] 王赟,熊仲明,张波.双层打包带加固村镇砖墙的抗震性能试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3): 568-572, 585. Wang Y, Xiong Z M, Zhang B. Experimental study of seismic performance of rural brick walls reinforced with double-layer packing belt [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 568-572, 585. (in Chinese)
- [9] 姜忻良,薛瑜照,姜南,等.新型石膏混凝土复合墙板 L 型节点的连接性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(5): 1531-1537. Jiang X L, Xue Y Z, Jiang N, et al. Connection performance research of new type gypsum concrete composite L-shaped wall [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(5): 1531-1537. (in Chinese)
- [10] 民用建筑热工设计规范: GB 50176—1993[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [11] 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, 2015.
- [12] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [13] Soheil S F, Varma A H, Seo J, et al. Cyclic lateral loading behavior of composite plate shear walls/Concrete Filled [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(10): 04021145.
- [14] 韩建强,李莉,王一功,等.C80 高强混凝土钢板剪力墙抗震延性关键技术试验研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(12): 27-38. Han J Q, Li L, Wang Y G, et al. Experimental study on seismic ductility of C80 high strength concrete-steel composite shear walls [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(12): 27-38. (in Chinese)
- [15] Gu Q, Zhao D F, Tan Y, et al. Experimental study on L-shaped precast concrete superposed shear walls under quasi-static cyclic loading with different axial compressive load ratios [J]. Engineering Structures, 2022, 254: 113857.
- [16] Zhang Z D, Singh A, Derveni F, et al. Cyclic experiments on isolated steel sheet connections for CFS framed steel sheet sheathed shear walls with new configurations [J]. Engineering Structures, 2021, 244: 112805.
- [17] 孙国华,方有珍,蒋明,等.钢筋混凝土剪力墙板的剪切滞回性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(10): 9-17. Sun G H, Fang Y Z, Jiang M, et al. Experimental investigation on cyclic shear behavior of reinforced concrete shear wall panels [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(10): 9-17. (in Chinese)
- [18] Park Y J, Ang A H. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1985, 111(4): 722-739.
- [19] 陈林之,蒋欢军,吕西林.修正的钢筋混凝土结构 Park-Ang 损伤模型 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 1103-1107. Chen L Z, Jiang H J, Lu X L. Modified park-ang damage model for reinforced concrete structures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(8): 1103-1107. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)