

# 带暗柱拼缝的单面叠合式剪力墙抗震性能试验研究

马巍<sup>1,2</sup>,徐凯<sup>1</sup>,黄旭辉<sup>1</sup>,段建华<sup>1</sup>,倪良坤<sup>1</sup>

(1. 安徽建筑大学土木工程学院,安徽 合肥 230601;2. 安徽省装配式建筑研究院,安徽 合肥 230601)

**摘要** 为了更好地满足建筑工业化的要求,同时解决预制墙体的尺寸受运输及吊装等因素限制等问题,提出利用暗柱水平拼接两片墙板形成整体剪力墙,并对其进行抗震性能试验研究。**方法** 对带暗柱拼缝的单面叠合式剪力墙和整体单面叠合式剪力墙进行拟静力试验,以有无暗柱拼缝作为变化参数,对比分析两种新型构件的破坏模式、滞回性能、延性性能以及耗能能力等抗震性能指标;并通过非线性有限元软件 ABAQUS 模拟进行分析。**结果** 带暗柱拼缝的单面叠合式剪力墙与同几何尺寸的整体单面叠合式剪力墙破坏形式基本一致,均呈弯剪破坏;滞回性能、延性性能以及耗能能力等抗震性能指标相似;两种构件的有限元模拟分析与试验结果吻合较好。**结论** 带暗柱拼缝的单面叠合式剪力墙抗震性能与整体单面叠合式剪力墙基本一致,可用于装配式混凝土剪力墙结构体系。

**关键词** 单面叠合式剪力墙;抗震性能;竖向拼缝;暗柱;非线性有限元

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Experimental Study on the Seismic Behaviour of a Single-faced Superposed Shear Wall with the Concealed Column Joints

MA Wei<sup>1,2</sup>, XU Kai<sup>1</sup>, HUANG Xuhui<sup>1</sup>, DUAN Jianhua<sup>1</sup>, NI Liangkun<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei, China, 230601; 2. Prefabricated Building Research Institute of Anhui Province, Hefei, China, 230601)

**Abstract:** In order to satisfy the requirements of building industrialization better, at the same time, to solve the problem that the size of the prefabricated wall is restricted by factors such as transportation and hoisting, this paper proposes using the concealed column to connect the two single-faced superposed shear walls horizontally, and get experimental study on its seismic behaviour. This paper carried out pseudo-static tests on single-faced superposed shear wall with

收稿日期:2020-12-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0701500);安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2020A0454)

作者简介:马巍(1972—),男,教授,主要从事装配式结构抗震等方面研究。

concealed column joints and integral single-faced superposed shear wall. By setting the concealed column joint as the variation parameter, the seismic behaviour indexes such as failure mode, hysteretic performance, ductility performance, stiffness degradation, energy dissipation capacity of the two new types of structures were compared and analyzed. Then the nonlinear finite element software ABAQUS was used to verify the results. The failure mode of single-faced superposed shear wall with concealed column joints is basically the same as the integral single-faced superposed shear wall with the same geometric size. Both of them are bending-shear failure modes, and have similar seismic behaviour indexes. The finite element analysis is consistent with the experimental results as well. The seismic behaviour of the single-faced superposed shear wall with concealed column joints is basically the same as the integral single-faced superposed shear wall. The single-faced superposed shear wall with concealed column joints can be used in the prefabricated concrete shear wall structure system.

**Key words:** single-faced superposed shear wall; seismic behaviour; vertical seam; concealed column; nonlinear finite element

叠合式剪力墙结构由于其良好的装配性,成为中外专家学者关注的焦点。众多学者已经进行了大量的试验研究和理论分析,以研究整体可靠性、构件的承载能力以及弯曲性能。研究表明:采用混凝土和钢筋传递剪力的叠合式剪力墙具有较高的整体性能、抗弯和抗剪能力<sup>[1-5]</sup>。叠合式剪力墙结构与现浇剪力墙结构相比,具有空腔墙板构件自重轻、道路运输效率高、装配施工后结构整体性强等优点,是一种极具应用前景的装配式混凝土建筑结构体系。

国外的叠合式剪力墙和国内在构造上有所区别,国外文献称之为三明治墙,该墙板的做法是在内外预制构件中填充不同材料的保温板。国外研究者对三明治墙进行了多方面的试验,重点在于对平面外抗弯性能、轴心和偏心受压性能及剪力连接键性能的研究<sup>[6-10]</sup>,而对其抗震性能的研究甚少。I. Ricci等<sup>[11]</sup>对现浇夹心三明治墙进行了抗震性能试验研究,试验结果表明:此类结构具有较高的延性,其抗震性能与整浇混凝土墙板相似。我国是多地震国家<sup>[12]</sup>,必须考虑叠合式剪力墙的抗震性能。叶献国等<sup>[13]</sup>对4片双面叠合式剪力墙进行拟静力试验,试验结果表明:在轴压比为0.1,高宽比为1.72下的叠合式剪力墙试件的破坏形态与现浇剪力墙相

同,均为弯曲破坏。张伟林等<sup>[14]</sup>对T形、L形双面叠合式墙体抗震性能进行拟静力试验研究,试验结果表明:在轴压比为0.1下T形、L形叠合剪力墙试件的滞回曲线、骨架曲线和同尺寸的现浇剪力墙基本一致,叠合面之间未出现滑移,说明格构钢筋作为剪力连接剪可以满足叠合式剪力墙整体性能的要求。沈小璞等<sup>[15]</sup>分别对竖向拼缝处采用水平钢筋和暗柱的双面叠合剪力墙进行了拟静力试验,研究了竖向拼缝采用不同结构连接的受力情况,研究表明:在轴压比为0.1时,高宽比为1.4的剪力墙试件破坏时表现为弯剪破坏,与全现浇剪力墙的破坏模式基本相同。种迅等<sup>[16]</sup>提出了水平节点强连接设计,解决了双面叠合式剪力墙的薄弱环节,研究表明:节点钢筋面积较大的试件承载力比面积较小的试件的承载力大17%左右。国内学者集中于对双面叠合式剪力墙的整体及拼缝连接处抗震性能的突破,而对单面叠合式剪力墙抗震性能的研究以及得到的试验成果相对较少<sup>[17-18]</sup>。

近年来,考虑到国家绿色建筑的推广和向建筑业转型的实现,在预制构件中填充保温材料,通过FRP连接件连接成一个整体进行工作。该保温墙体具有制作工艺简单、质量优良、成本低廉、防火、节能和结构稳定一体化的优点。单面叠合式剪力墙结构体系的

预制墙体在工厂制作完成,预制墙体的尺寸受运输及吊装等因素的限制,存在叠合墙体水平拼接的问题。鉴于此,笔者对带暗柱拼缝的单面叠合式剪力墙开展了试验研究,对比同几何尺寸的整体单面叠合式剪力墙破坏模式、滞回性能、延性性能、刚度退化以及耗能能力等抗震性能指标研究暗柱拼缝对单面叠合式剪力墙的整体非线性行为影响,并通过非线性有限元软件 ABAQUS 模拟分析进行验证,笔者所得相关理论研究为叠合式剪力墙结构的推广应用提供了参考。

1 试验概况

1.1 试验设计

笔者设计制作 2 片剪力墙试件,试件 SW-1 为带暗柱拼缝的单面叠合式剪力墙,试件 SW-2 为整体单面叠合式剪力墙。2 片剪力墙试件均由基座、单面叠合墙板、顶梁三部分组成。试件宽×高×厚均为 2 000 mm×2 800 mm×280 mm,试件 SW-1 由两片宽×高×厚为 990 mm×2800 mm×280 mm 的单面叠合式剪力墙水平拼接而成,拼缝宽度为 10 mm;试件 SW-1 拼缝处设置暗柱,用来连接两片预制墙板,暗柱箍筋截面尺寸为 320 mm×120 mm,配置箍筋 Φ10@200 和纵筋 4Φ12。试件 SW-2 为整体无拼缝的单面叠合式剪力墙。内叶板和外叶板厚度均为 50 mm,后浇腔内混凝土厚度为

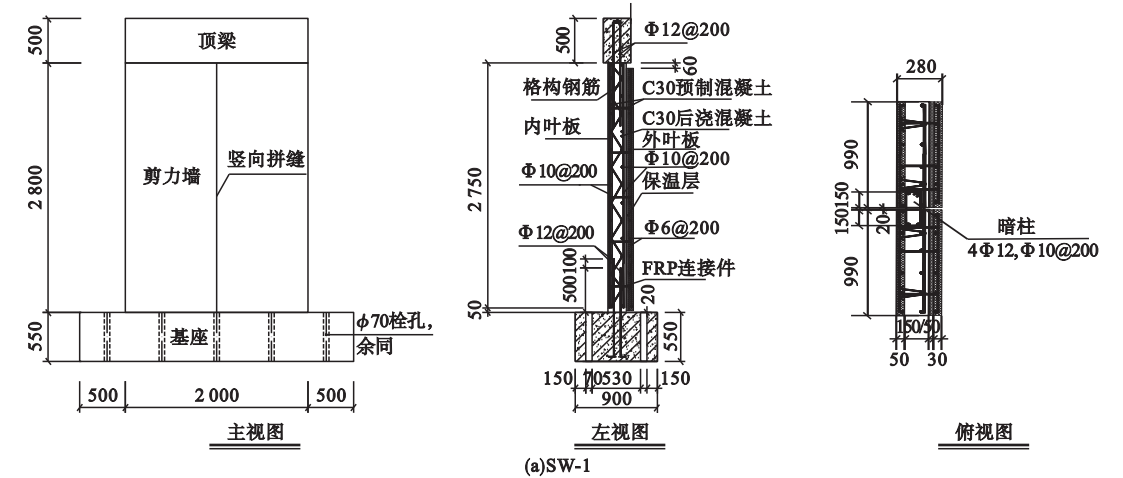
150 mm,保温层厚度为 30 mm。FRP 连接件贯穿内叶板、后浇混凝土、保温层和外叶板形成有效拉接,连接件在墙板内均匀布置间距为 400 mm。内叶板和后浇腔内钢筋网通过格构筋连接,水平和竖向受力筋均为 Φ10@200;外叶板水平和竖向分布筋均为 Φ6@200;基座和顶梁插筋为 Φ12@200。通过内腔浇筑混凝土将基座、预制墙板、顶梁三者形成整体,两个试件的预制和现浇部分均采用 C30 混凝土。为考察拼接单面叠合剪力墙的拼接效果,减少其他因素的影响,2 个试件均设计为一字形,构件配筋满足《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)的要求,但不设置翼缘及约束边缘构件。钢筋和混凝土主要材料力学性能如表 1 和表 2 所示。构件的几何尺寸及配筋如图 1 所示。

表 1 钢筋材料力学性能

| Table 1 Material properties of steel bar |                    |                                   |                                   |                    |
|--|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| 钢筋型号                                     | 直径<br><i>d</i> /mm | 屈服强度<br><i>f<sub>y</sub></i> /MPa | 抗拉强度<br><i>f<sub>u</sub></i> /MPa | 伸长率<br><i>A</i> /% |
| HRB400                                   | 6                  | 542.5                             | 626.8                             | 13.2               |
| HRB400                                   | 10                 | 492.2                             | 525.1                             | 11.9               |
| HRB400                                   | 12                 | 544.2                             | 668.2                             | 12.5               |

表 2 混凝土材料力学性能

| Table 2 Material properties of concrete |                                    |
|---|------------------------------------|
| 试件部位                                    | 立方体抗压强度 <i>f<sub>cu</sub></i> /MPa |
| 预制构件                                    | 33.5                               |
| 后浇腔内                                    | 33.3                               |



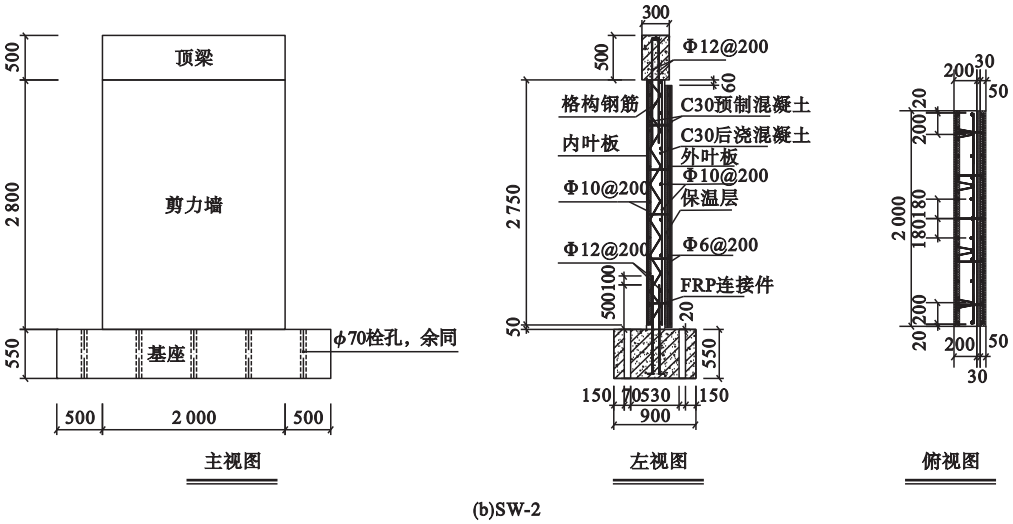


图 1 试件几何尺寸及配筋

Fig. 1 Dimensions of specimens and arrangement of reinforcement

1.2 加载制度

本次试验在安徽省建筑结构与地下工程重点实验室进行,在恒定竖向荷载下,施加水平低周往复荷载,进行拟静力试验。通过油压千斤顶及反力梁组合装置对顶梁中心处施加竖向荷载,由 100T 级的电液伺服作动器对顶梁施加水平推力。试验的加载按照《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)规定的标准加载方法进行加载。加载装置图如图 2 所示。

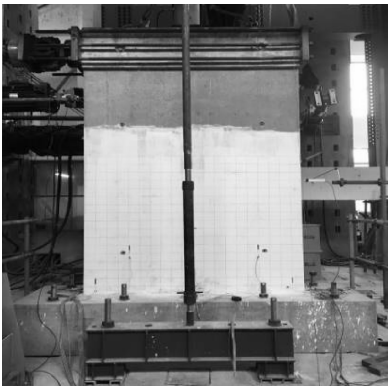


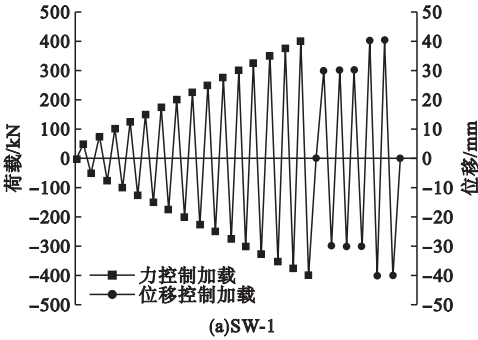
图 2 加载装置图

Fig. 2 The diagram of loading device

试件基座通过地脚螺栓固定,对应设计轴压比为 0.1,试件顶部通过油压千斤顶及反力梁组合装置施加 600 kN 的竖向荷载;试验过程中保持该竖向荷载不变。

水平加载方式为双向低周往复加载,加载制度选取荷载 - 位移混合控制加载。第一阶段采用荷载控制加载,水平力从 50 kN 开始加载,并以 25 kN 为级差加至试件屈服,每级荷载循环一次;当试件屈服后采用位移控制加载,选取剪力墙顶部外置位移计所测得水平位移的位移值的倍数逐级加载。循环加载,每级位移均循环三次。根据《混凝土结构试验方法标准》(GBT 50152—2012),当加载至试件自身破坏或试件加载值下降到最大荷载值的 85% 时,试验结束。

本试验试件 SW-1 位移加载从 30 mm 循环开始,加载至 40 mm 第二个循环时,试件发生破坏,试验结束,试件 SW-1 加载制度图见图 3(a) 所示;由于试件破坏较快,改变试件 SW-2 的加载制度,位移加载从 20 mm



(a)SW-1



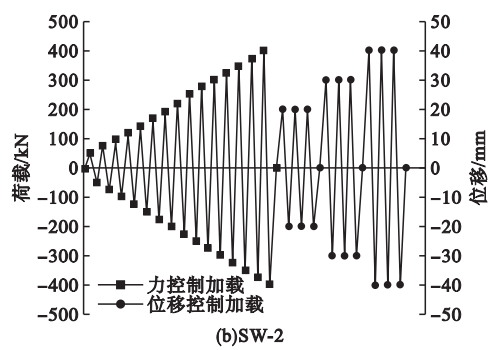


图3 加载制度

Fig. 3 Loading system

循环开始,加载至 40 mm 第三个循环时,试件发生破坏,试验结束,试件 SW-2 加载制度图见图 3(b)所示。

1.3 试验现象及破坏模式

试件最终破坏形态均表现为弯剪破坏,受拉侧钢筋屈服,受压侧混凝土压溃,边缘纵筋弯曲外露,达到强剪弱弯的设计目的。

1.3.1 试件 SW-1 破坏现象

定义加载推为正( + ),拉为负( - ),内叶板一侧为墙体北侧,下同。水平荷载从开始加载至 -225 kN 时,内叶板右侧距离基座 50 mm 高度附近出现初始细小裂缝,最大裂缝宽度为 0.10 mm;加载至 +400 kN 时,整个内叶板底部与基座接触部位出现多条裂缝,内叶板左侧和墙体东侧底部出现开裂,此时边缘端部钢筋应变发生突变,试件进入屈服阶段,此时改为位移加载。位移加载至 -40 mm 第二次循环时,墙板西侧混凝土脱落,墙板东侧底部混凝土压碎破坏,钢筋弯曲外露,试件破坏。裂缝产生范围均为墙体高度 1 300 mm 范围内,裂缝最大宽度约为 3.5 mm;整个破坏过程中,外叶板无裂缝出现,其他墙面裂缝开展比较充分。试件SW-1 裂缝走势及破坏现象如图 4 所示。

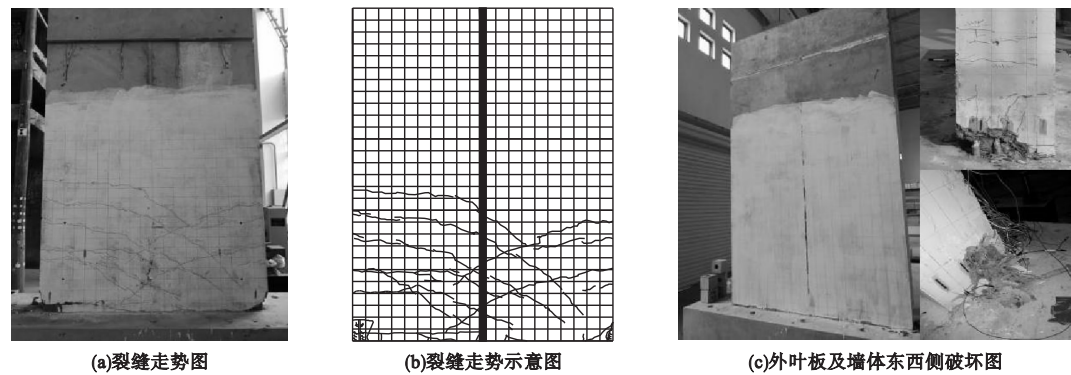


图4 SW-1 裂缝走势及破坏现象

Fig. 4 Crack trend and failure phenomenon of SW-1

1.3.2 试件 SW-2 破坏现象

水平荷载从开始加载至 -200 kN 时,内叶板右侧距离基座 50 mm 高度附近出现初始细小裂缝,最大裂缝宽度为 0.24 mm;加载至 +500 kN 时,墙体西侧距基座 100 mm 高度处混凝土压碎脱落,墙体东侧根部脱离基座产生缝隙,此时改为位移加载。位移加载至 -40 mm 时,墙体东侧底部大块混凝土压碎破坏,试件破坏。裂缝产生范围为墙体高度 1400 mm 范围内,裂缝最大宽度约为 3.5 mm。整个破坏过程中,外叶板无裂缝出

现,其他墙面裂缝开展比较充分。试件 SW-2 裂缝走势及破坏现象如图 5 所示。

1.3.3 破坏模式对比分析

通过低周往复加载试验可知:试件 SW-1、SW-2 均是在墙体边缘先出现水平裂缝,随着荷载的加大,部分水平裂缝逐渐延伸发展为弯剪斜裂缝,斜裂缝基本上是 45°走向最终呈现 X 形交叉斜裂缝。从裂缝的发展过程和分布可以看出,试件的破坏过程是先弯曲后剪切,属于弯剪破坏形态。墙体上半部分基本完好,底部两端混凝土均被压酥、剥

落。从开始加载到破坏的整个加载过程中,试件 SW-1 中暗柱拼缝始终未见滑移,且裂缝发展较为充分,说明暗柱拼缝构造合理,可以使两片单面叠合式剪力墙有效拼接形成整体共同受力;试件 SW-1、SW-2 新老混凝土

叠合面处没有出现上下错动脱离,说明格构钢筋的构造措施能够使预制构件和现浇部分形成整体,协同工作。在整个试验中,外叶板始终无裂缝,说明保温板在试验过程中并未参与受力,只起到保温作用。

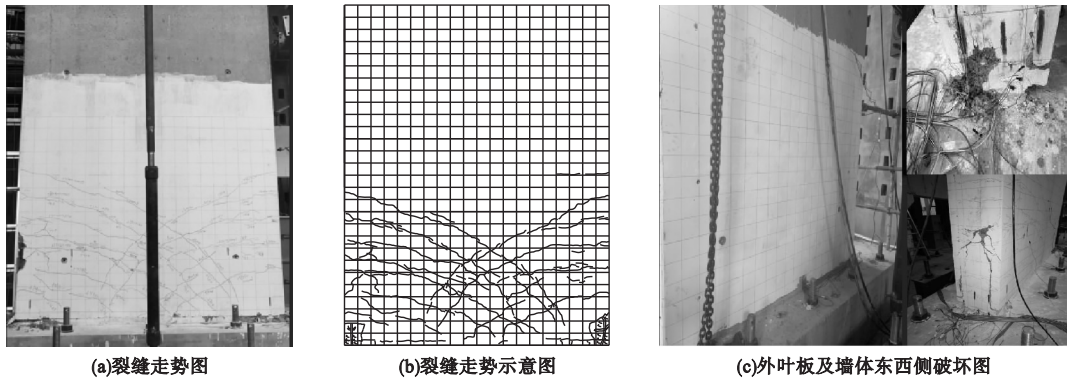


图 5 SW-2 裂缝走势及破坏现象

Fig. 5 Crack trend and failure phenomenon of SW-2

2 试验结果分析

2.1 滞回曲线

各试件的滞回曲线如图 6 所示,其中横

坐标为顶点水平位移  $\Delta$ ,纵坐标为顶点水平加载力  $P$ 。

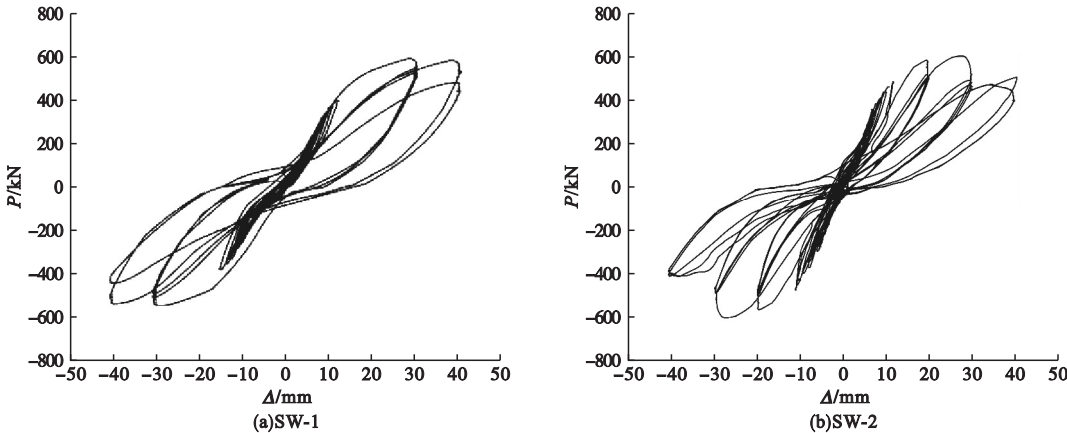


图 6 试件滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis loop of the specimen

由图 6 可发现:各试件开裂前基本一致,滞回曲线包络面积均较小,荷载与位移基本呈线性关系,加载初期符合弹性阶段的受力状态,滞回曲线基本呈直线;试件屈服后进入位移控制阶段,此时滞回曲线包络的面积逐渐变大,此时各试件耗能能力均有所提高,但斜率明显减小,表明试件刚度退化程度逐渐

增加,同时各试件的残余变形也逐渐增大;各试件的滞回曲线均是由前期的“梭形”逐渐变化成“弓形”,滞回曲线均较为饱满,且有明显捏拢现象;每一个位移量级均循环三次,对同一位移量级,后两次循环的滞回曲线所包络面积小于第一次循环,表明试件耗能能力由于试件内部损伤逐渐削弱。对比试件

SW-1 和 SW-2,可以看出带暗柱拼缝的单面叠合式剪力墙和整体单面叠合式剪力墙的滞回曲线相似,承载能力和变形能力基本相当,表明竖向拼缝对新型单面叠合式剪力墙的滞回性能影响较小,暗柱能够使拼接后的单面叠合剪力墙形成整体共同抵抗外荷载。注意:试件 SW-1 在位移加载至 20 mm 处无滞回环,这是因为位移加载制度不同导致。

2.2 骨架曲线

骨架曲线是其承载力与位移关系的体现<sup>[19]</sup>,图 7 为骨架曲线对比图。

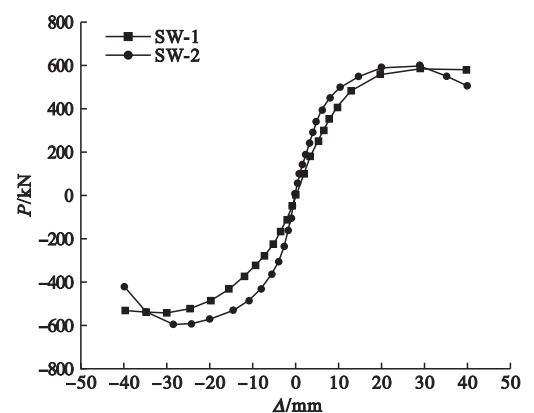


图 7 骨架曲线

Fig. 7 Skeleton curve

由图 7 可以看出:在弹性阶段,两个试件骨架曲线吻合较好,曲线斜率基本都是直线,说明此时试件刚度和侧移量变化不大;进入塑性阶段后,随着荷载的循环增加,当墙体出现裂缝后,曲线斜率逐渐减小,两个试件均呈现出弯曲形态;随着墙体的裂缝增多增大,骨架曲线上最终出现明显的拐点,开始向位移

轴弯曲,曲线斜率变为负值,试件进入弹塑性阶段,此过程试件的承载力急速下降并且刚度退化加快,直至试件完全破坏。对比试件 SW-1 和 SW-2,可以看出试件在加载到峰值荷载前,试件 SW-2 的受弯承载力要明显高于 SW-1,说明整体单面叠合式剪力墙的整体性能更好,在前期可以更好地抵抗荷载;后期带暗柱拼缝的单面叠合式剪力墙表现出更加稳定的性能,比如刚度退化程度较 SW-2 低,承载能力较 SW-2 高等,说明暗柱可以在墙体发生破坏后承担耗能构件的作用。由正向骨架曲线可知,试件 SW-1 和 SW-2 峰值荷载基本相同,但是负向骨架曲线显示 SW-2 峰值荷载明显高于 SW-1,这是因为尽管本试验的试件是对称的,但由于剪力墙通常在很小位移角时就开裂,且混凝土材料具有离散型,所以正、负两向的骨架曲线有一定差异。

2.3 承载力及延性性能

骨架曲线各特征点的计算荷载和计算位移对比<sup>[20]</sup>见表 3 所示。由表 3 可以看出,试件 SW-2 屈服荷载和峰值荷载较 SW-1 提高了 9%、7%,说明带暗柱拼缝的单面叠合式剪力墙在弹塑性阶段承载能力较整片单面叠合式剪力墙要弱一些;试件 SW-1 平均位移延性系数( $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ )为 2.35,试件 SW-2 的平均位移延性系数为 2.32,基本相同,说明暗柱拼缝对新型单面叠合式剪力墙的延性性能基本无影响;试件 SW-1 的最大层间位移

表 3 计算结果对比

Table 3 Comparison of calculation results

| 试件   | 方向 | 开裂点         |                  | 屈服点      |               | 峰值点      |               | 极限点      |               | 延性系数<br>$\mu$ | 极限位移角<br>$\theta_p$ |
|------|----|-------------|------------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|---------------|---------------------|
|      |    | $F_{cr}/kN$ | $\Delta_{cr}/mm$ | $F_y/kN$ | $\Delta_y/mm$ | $F_m/kN$ | $\Delta_m/mm$ | $F_u/kN$ | $\Delta_u/mm$ |               |                     |
| SW-1 | 正向 | 350         | 10.07            | 480      | 15.52         | 580      | 30.48         | 493      | 37.62         | 2.42          | 1/87                |
|      | 反向 | 225         | 8.77             | 450      | 16.39         | 545      | 30.62         | 463      | 37.35         | 2.28          | 1/88                |
|      | 均值 | 288         | 9.42             | 465      | 15.96         | 562.5    | 30.55         | 478      | 37.49         | 2.35          | 1/88                |
| SW-2 | 正向 | 225         | 4.81             | 519      | 14.77         | 606      | 27.25         | 515      | 34.11         | 2.31          | 1/97                |
|      | 反向 | 200         | 5.68             | 494      | 14.68         | 601      | 28.28         | 510      | 34.25         | 2.33          | 1/96                |
|      | 均值 | 212.5       | 5.25             | 506.5    | 14.73         | 603.5    | 27.77         | 512.5    | 34.18         | 2.32          | 1/97                |

角为 1/88,SW-2 的最大层间位移角为 1/97,根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)给出的剪力墙结构对应各种性能级别的最大层间位移角( $\theta_p = \Delta_u/H$ ),可知两试件极限位移角均大于倒塌状况下最大层间位移角值(1/120),说明带暗柱拼缝的单面叠合式剪力墙试件和整体单面叠合式剪力墙试件均满足《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)的抗震变形能力要求,表明新型单面叠合式剪力墙结构具有较好的变形能力。

2.4 耗能能力

耗能能力是衡量结构抗震性能的一个重要的指标,而等效黏滞阻尼系数  $h_e$  则是衡量耗能能力最客观、最全面的体现, $h_e$  的数值由式(1)确定:

$$h_e = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{S_{(ABCD)}}{S_{(ODE+OAF)}} \tag{1}$$

式中:点 D、点 A 分别对应滞回环正负向峰值点; $S_{(ABCD)}$  为一次位移加载得到的滞回环面积, $S_{(ODE+OAF)}$  为对应的循环中等效弹性体出现同位移所消耗的能量。 $h_e$  计算示意图如图 8 所示,该系数越大,则耗能能力越大。

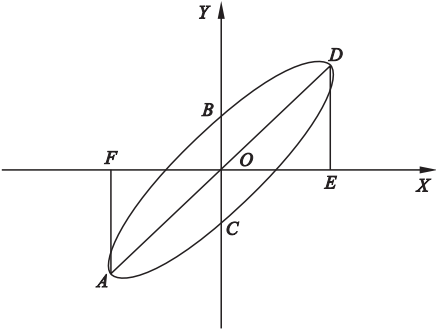


图 8 等效黏滞阻尼系数计算示意图

Fig.8 Coefficient calculation diagram of  $h_e$

两试件在位移循环阶段的  $h_e$  计算结果如表 4 所示。在位移控制模式下,随着水平位移的增加,两试件等效黏滞阻尼系数  $h_e$  均逐渐增大,说明两个试件的耗能能力均逐渐增加。注意:由于试件 SW-1 加载制度不同,导致试件在 20 mm 处无等效黏滞阻尼系数。试件 SW-1 位移加载至 30 mm、40 mm 处  $h_e$

均高于 SW-2,说明暗柱拼缝对新型单面叠合式剪力墙的耗能能力有一定影响,此阶段带暗柱拼缝的单面叠合式剪力墙抗震性能要略高于整体单面叠合式剪力墙。

表 4 各试件  $h_e$  计算结果比较

Table 4 Comparison of  $h_e$  calculation results

| 试件编号 | $h_e$                   |                         |                         |
|------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|      | $\Delta = 20\text{ mm}$ | $\Delta = 30\text{ mm}$ | $\Delta = 40\text{ mm}$ |
| SW-1 | —                       | 0.108                   | 0.158                   |
| SW-2 | 0.086                   | 0.101                   | 0.134                   |

注: $h_e$  为各试件位移  $\Delta$  加载至 20 mm、30 mm、40 mm 处等效黏滞阻尼系数。

3 有限元分析

笔者采用非线性有限元分析软件 ABAQUS 对本次试验进行模拟,并通过有限元分析结果与试验数据进行对比分析。

3.1 滞回曲线对比

图 9 为各试件滞回曲线对比结果。由滞回曲线对比图可知,在弹性阶段,试件 SW-1、SW-2 滞回曲线的模拟结果与试验结果基本吻合;在塑性阶段,模型滞回曲线较试验更加饱满,而试验滞回曲线的捏拢现象较模拟更为明显,这是因为试件中的钢筋发生黏结滑移导致的,而模型处于理想状态,钢筋和混凝土之间采用的是 Embedded Region(嵌入区域约束)命令,并未考虑钢筋滑移对剪力墙造成的影响,使得有限元模型滞回曲线较试验更饱满。

3.2 骨架曲线对比

试件 SW-1、SW-2 数值模型在低周往复荷载作用下的顶点水平位移—荷载曲线与试验曲线对比如图 10 所示。从骨架曲线对比图可知,试验得到与模拟计算出的骨架曲线总体趋势基本一致,均呈现出 S 形,说明试件在加载过程中经历了弹性阶段、强化阶段及刚度退化阶段,有限元模拟的发展趋势与试验结果保持一致性;有限元模型的屈服位移、峰值位移较试验均提前出现,这是由于模



型处于理想状态,初始抗侧刚度比试验值高导致。

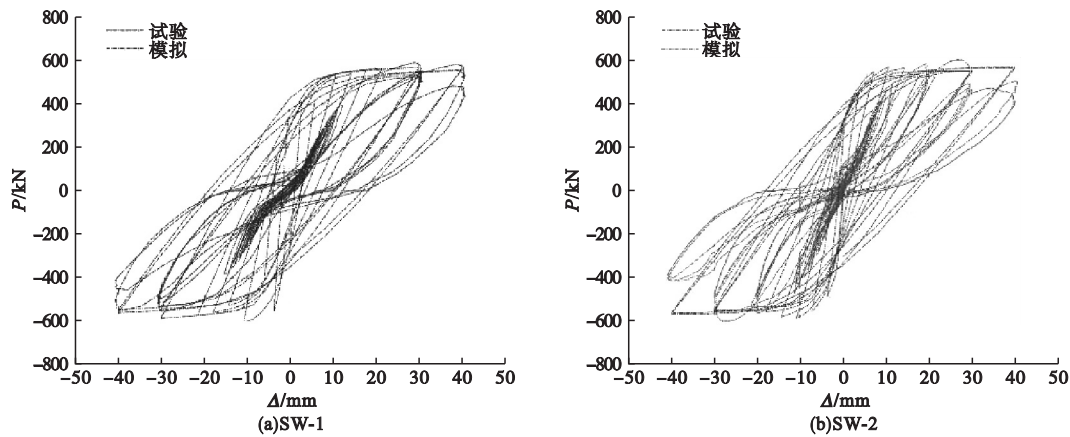


图9 滞回曲线对比图

Fig. 9 Comparison diagram of the hysteresis loop

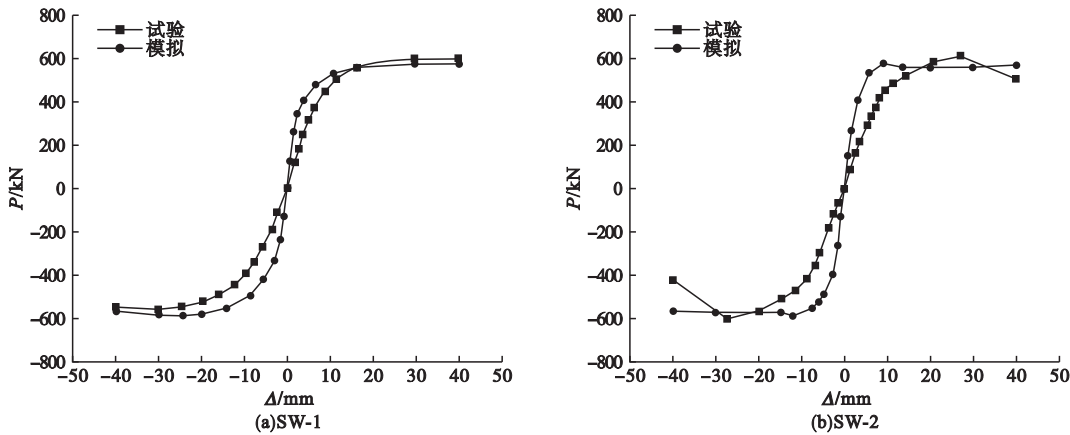


图10 骨架曲线对比图

Fig. 10 Comparison diagram of skeleton curves

4 结 论

- (1)带暗柱拼缝的单面叠合剪力墙试件与整体单面叠合式剪力墙试件的破坏形式基本相同,滞回性能、延性性能相似,说明暗柱能够使拼接后的单面叠合剪力墙形成整体共同抵抗外荷载。
- (2)对比分析两组剪力墙试件的等效黏滞阻尼系数可发现:暗柱拼缝对新型单面叠合式剪力墙的耗能能力有一定影响,在位移加载阶段带暗柱拼缝的单面叠合式剪力墙耗能性能要略高于整体单面叠合式剪力墙。
- (3)通过有限元分析可知合理的有限元建模参数及分析方法能够较为准确地反映单

面叠合式剪力墙结构的抗震性能。

参考文献

[ 1 ] 徐培福,黄吉锋,陈富盛.近50年剪力墙结构震害及其对抗震设计的启示[J].建筑结构学报,2017,38(3):1-13.  
(XU Peifu, HUANG Jifeng, CHEN Fusheng, Earthquake damages to shear wall structure in last fifty years and seismic design enlightenment [ J ]. Journal of building structures, 2017, 38(3): 1-13.)

[ 2 ] 连星,叶献国,常磊,等.叠合板式剪力墙地震破坏指标计算模型分析[J].上海交通大学学报,2010,44(6):739-744.  
(LIAN Xing, YE Xianguo, CHANG Lei, et al. Analysis on calculation model for seismic damage index of the superimposed slab shear walls [ J ]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2010, 44(6): 739-744.)

[ 3 ] 李宏男,李兵.钢筋混凝土剪力墙抗震恢复力模型及试验研究[J].建筑结构学报,2004,25

- (5):35-42.  
(LI Hongnan, LI Bing. Experimental study on seismic restoring performance of reinforced concrete shear walls [J]. Journal of building structures, 2004, 25(5):35-42.)
- [4] 任军, 叶献国. 不同轴压比下叠合板式剪力墙的抗震性能研究[J]. 结构工程师, 2010, 26(5):66-72.  
(REN Jun, YE Xianguo. Seismic behavior research on the superimposed slab shear walls for different axial-load ratios [J]. Structures engineers, 2010, 26(5):66-72.)
- [5] 方自虎, 李向鹏, 简旭阳, 等. 钢筋混凝土梁柱节点超自由度单元[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017(6):59-63.  
(FANG Zihu, LI Xiangpeng, JIAN Xuyang, et al. Super DOF element of RC beam-column joint [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2017(6):59-63.)
- [6] BENAYOUNE A, AZIZ A, SAMAD A, et al. Structural behaviour of eccentrically loaded precast sandwich panels [J]. Construction and building materials, 2006, 20(9):713-724.
- [7] BENAYOUNE A, SAMAD A A A, ALI A A A. Response of pre-cast reinforced composite sandwich panels to axial loading [J]. Construction & building materials, 2007, 21(3):677-685.
- [8] FRANKL B A, LUCIER G W, HASSAN T K, et al. Behavior of precast, prestressed concrete sandwich wall panels reinforced with CFRP shear grid [J]. PCI journal, 2011, 56(2):42-54.
- [9] 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):595-605.
- [10] MUGAHED A Y H, ABANG A A A, RASHID R S M, et al. Structural behavior of axially loaded precast foamed concrete sandwich panels [J]. Construction & building materials, 2016, 107:307-320.
- [11] RICCI I, PALERMO M, GASPARINI G, et al. Results of pseudo-static tests with cyclic horizontal load on cast in situ sandwich squat concrete walls [J]. Engineering structures, 2013, 54:131-149.
- [12] 周锡元. 中国建筑结构抗震研究和实践六十年[J]. 建筑结构, 2009, 39(9):1-14.  
(ZHOU Xiyuan. Research and practice of earthquake resistance of building structures for 60 years in China [J]. Building structures, 2009, 39(9):1-14.)
- [13] 连星, 叶献国, 王德才, 等. 叠合板式剪力墙的抗震性能试验分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(8):1219-1223.  
(LIAN Xing, YE Xianguo, WANG Decai, et al. Experimental analysis of seismic behavior of superimposed slab shear walls [J]. Journal of Hefei university of technology, 2009, 32(8):1219-1223.)
- [14] 张伟林, 沈小璞, 吴志新, 等. 叠合板式剪力墙 T 型、L 型墙体抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2012, 29(6):196-201.  
(ZHANG Weilin, SHEN Xiaopu, WU Zhixin, et al. Experimental study on seismic performance of T-type and L-type composite slab shear walls [J]. Engineering mechanics, 2012, 29(6):196-201.)
- [15] 沈小璞, 马巍, 陈信堂, 等. 叠合混凝土墙板竖向拼缝连接抗震性能试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010(9):1366-1371.  
(SHEN Xiaopu, MA Wei, CHEN Xintang, et al. Experimental study of the seismic performance of the vertical joint seam of superimposed concrete wall panels [J]. Journal of Hefei university of technology, 2010(9):1366-1371.)
- [16] 种迅, 叶献国, 蒋庆, 等. 水平拼缝部位采用强连接叠合板式剪力墙抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2015(10):43-48.  
(CHONG Xun, YE Xianguo, JIANG Qing, et al. Seismic performance study of the superimposed shear wall with strong connection in horizontal connection [J]. Building structures, 2015(10):43-48.)
- [17] 梅江昊. 带水平拼缝的装配整体式单面叠合剪力墙抗震性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.  
(MEI Jianghao. Research on seismic performance of assembled integral single-sided composite shear walls with horizontal joints [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.)
- [18] 凌裕跃. 单面叠合式剪力墙的抗震性能试验研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018.  
(LING Yuyue. Experimental study on seismic behavior of single-sided composite shear wall [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2018.)
- [19] 傅中秋, 吴东阳, 吉伯海, 等. 钢管轻集料混凝土柱水平往复荷载下滞回性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(2):16-24.  
(FU Zhongqiu, WU Dongyang, JI Bohai, et al. Experimental study on hysteretic behavior of LACFST columns under horizontal cyclic loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(2):16-24.)
- [20] 王滋军, 刘伟庆, 魏威, 等. 钢筋混凝土水平拼接叠合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7):147-155.  
(WANG Zijun, LIU Weiqing, WEI Wei, et al. Experimental study on seismic behavior of reinforced concrete composite shear wall with level splice [J]. Journal of building structures, 2012, 33(7):147-155.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)