

预制带肋叠合整体式剪力墙拟静力试验研究*

侯和涛^{1,2}, 马天翔¹, 曲哲², 崔士起³,
石磊³, 付玮琪¹, 程积润¹, 朱文灿¹

(1 山东大学土建与水利学院, 济南 250061; 2 中国地震局工程力学研究所, 哈尔滨 150080;
3 山东省建筑科学研究院, 济南 250031)

[摘要] 通过对1片普通钢筋混凝土现浇剪力墙和1片预制带肋叠合整体式剪力墙的拟静力试验,对两片剪力墙的破坏形态、承载力、变形能力、滞回特性、刚度退化、耗能能力等进行研究分析。结果表明:两片剪力墙均发生弯曲破坏;叠合剪力墙整体性好,其破坏形态、裂缝分布、滞回特性、刚度退化趋势与现浇剪力墙近似;叠合剪力墙的整体刚度大于现浇剪力墙,位移延性及耗能性能与现浇剪力墙相近。

[关键词] 叠合剪力墙; 预制带肋叠合板; 拟静力; 抗震性能

中图分类号: TU398 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2016)10-0014-06

Quasi-static experimental study on prefabricated superimposed ribbed reinforced integral shear wall

Hou Hetao^{1,2}, Ma Tianxiang¹, Qu Zhe², Cui Shiqi³, Shi Lei³, Fu Weiqi¹, Cheng Jirun¹, Zhu Wencan¹

(1 School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2 Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China; 3 Shandong Academy of Building Research, Jinan 250031, China)

Abstract: Quasi-static experiments on one piece of conventional reinforced concrete (RC) cast-in-situ shear wall and one piece of prefabricated superimposed ribbed reinforced integral shear wall were conducted. The failure patterns, bearing capacities, hysteretic characteristics, stiffness degradations and energy dissipation capacities of the two shear wall specimens were investigated. The result shows that there are flexural failures in both of the two specimens; superimposed shear wall has well integral properties and its failure pattern, crack distribution, hysteretic characteristic and stiffness degradation potential are similar as those of cast-in-situ shear wall; the integral stiffness of superimposed shear wall is higher than that of cast-in-situ shear wall and the displacement ductility and energy dissipation capacity of superimposed shear wall are close to those of the cast-in-situ shear wall.

Keywords: superimposed shear wall; prefabricated superimposed slab with ribs; quasi-static; seismic behavior

0 前言

装配式混凝土结构具有产品质量好、施工效率高、省模板、环境污染少等优点,具有良好的社会、经济及环保效益,有助于我国建筑产业现代化的推进。

叠合剪力墙为现场固定安装两侧混凝土板、浇筑双板中空区域形成,由于其工业化程度高和整体性优异的特点成为目前预制装配式剪力墙研究的热点。叶献国等^[1]对预制叠合板式混凝土剪力墙进行研究,结果表明,其叠合面抗剪强度高,整体性能好。肖全东^[2]等研究了双板短肢剪力墙,结果表明,与现浇剪力墙相比,两者有相近的位移延性和刚度退化。叶燕华^[3]等研究发现自密实混凝土的叠合剪力墙延性优于普通混凝土叠合剪力墙。Salmon^[4-5]等通过试验研究了三明治复合墙的基本力学性能。

本文提出一种两侧预制混凝土板采用带肋叠合板的新型叠合剪力墙,通过拟静力试验研究,分析该叠合剪力墙破坏形态、变形特征、滞回特性、刚度退

化和耗能能力,并与现浇剪力墙进行对比,为新型叠合剪力墙结构的工程应用提供试验依据。

1 试验概况

1.1 试件设计及制作

试验共制作2片足尺剪力墙试件W1、W2,其中W1为现浇剪力墙,W2为叠合剪力墙。2片剪力墙高3000mm、宽1200mm、厚200mm,暗柱尺寸为200mm×200mm。轴压比设定为0.15(按混凝土强度标准值计算)。试件参数及配筋如图1所示。其中叠合剪力墙预制部分采用C45混凝土,中间现浇部分与现浇剪力墙一致,采用C30混凝土。预制带肋叠合板由30mm厚底板和T形肋组成,底板内配置1570级 ϕ^H 4.8消除预应力螺纹肋钢丝,间距100mm,预应力钢丝重心到底板边缘的距离为

* 黑龙江省自然科学基金面上项目(E201469),国家自然科学基金面上项目(51478441),山东省墙材革新与建筑节能科研开发项目(鲁财建指(2014)139号)。
作者简介:侯和涛,博士后,副教授,硕导,一级注册结构工程师,Email:houhetao@sdu.edu.cn。

17.5mm; T 形肋翼缘宽 150mm、腹板高 80mm, T 形肋预留孔洞 110mm × 25mm, 孔中心距 200mm^[6]。为便于浇筑混凝土和布置钢筋, 叠合板设计为错肋形式, 如图 2 所示。

W2 试件制作时, 首先对两侧预制板板面进行拉毛处理以增强浇筑时新老混凝土的粘结, 在现场穿插绑扎好的竖向及水平向钢筋。将钢筋绑扎完好的两侧预制板吊装至设定位置, 用斜向支撑进行临时固定, 同时绑扎两侧暗柱受力钢筋并对该位置进行支模。然后在 W2 试件两侧预制板中间沿墙身高

度方向等距打孔安装 5 个对拉螺栓以增强叠合剪力墙整体性, 同时沿水平向及竖向进行模板加固, 以保证试件平面内平整度。最后浇筑中间空腔及边缘暗柱混凝土形成叠合剪力墙。

1.2 材料力学性能

预制带肋叠合板中配置 1570 级 $\phi^H 4.8$ 消除预应力螺纹钢。实测钢丝抗拉强度为 1 635MPa、弹性模量为 2.02×10^5 MPa。剪力墙的竖向及水平向受力钢筋等级为 HRB400 级, 实测力学性能如表 1 所示。

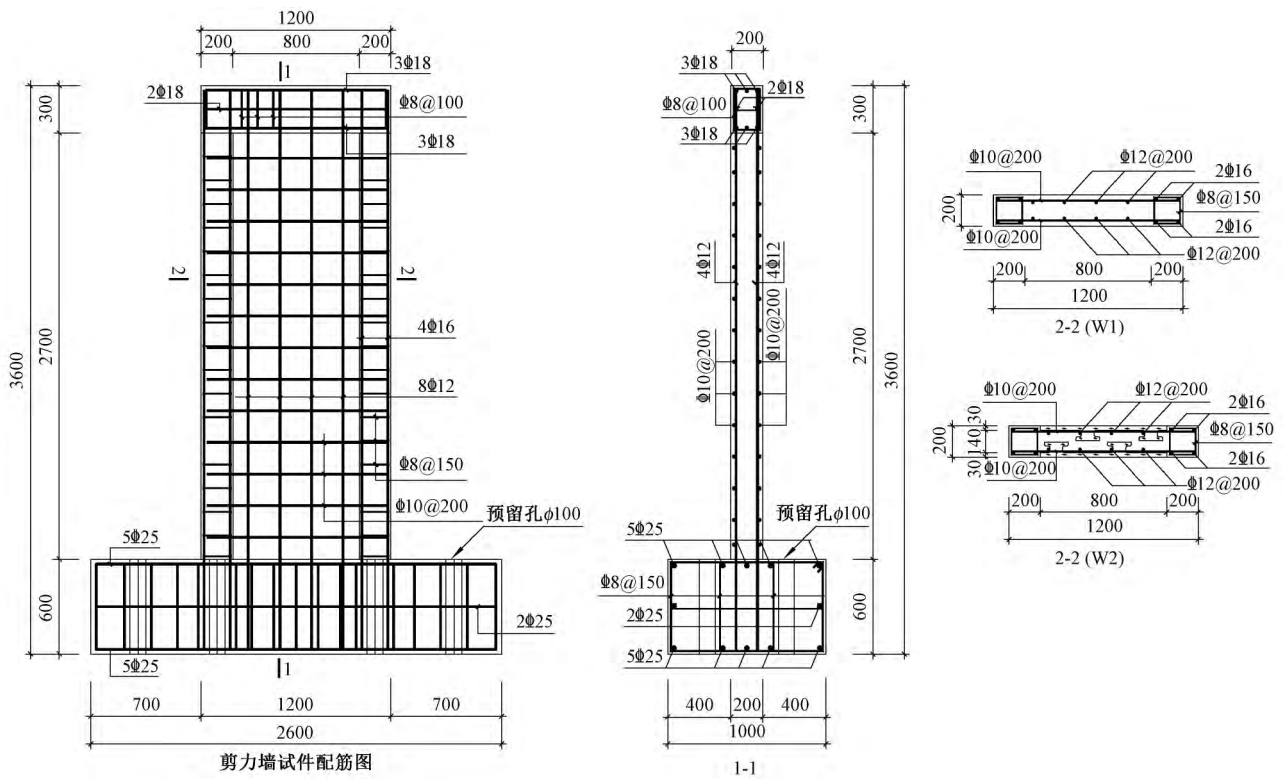


图 1 试件几何尺寸及配筋图

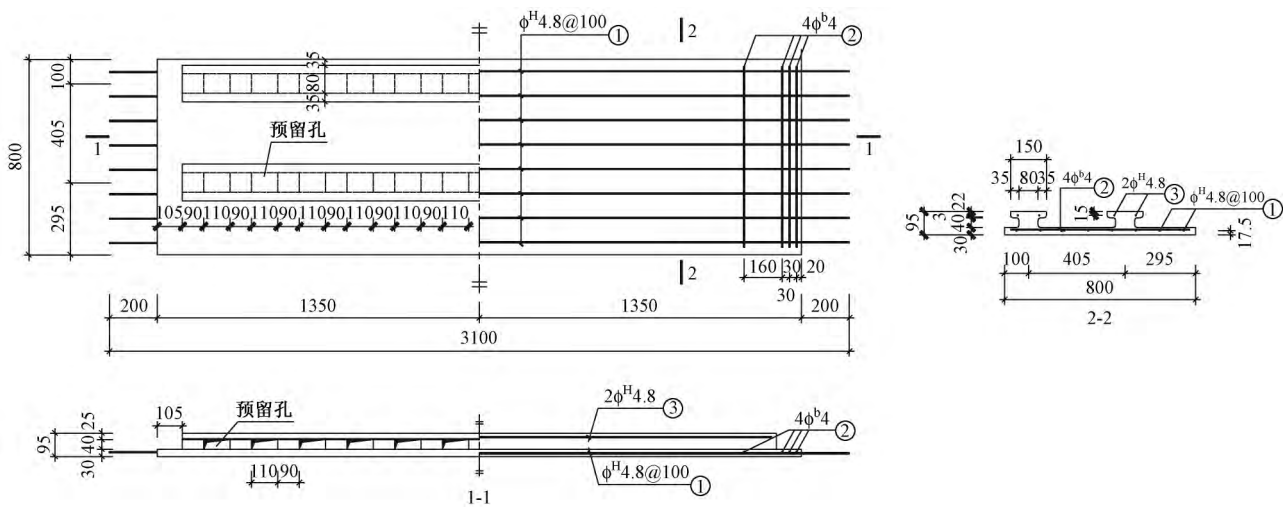


图 2 预制带肋叠合板结构

钢筋力学性能 表 1

钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/MPa
10	469.4	615.8	2.0×10^5
12	465.5	621.0	2.0×10^5
16	563.3	643.3	2.0×10^5

预制带肋叠合板的混凝土强度等级为 C45, 实测其立方体抗压强度为 51.8MPa、轴心抗压强度为 43.2MPa、弹性模量为 3.172×10^4 MPa; 现浇部分混凝土强度等级为 C30, 实测其立方体抗压强度为 33.8MPa、轴心抗压强度为 27.4MPa、弹性模量为 2.407×10^4 MPa。

1.3 试验加载装置及制度

试验在中国地震局工程力学研究所恢先地震工程综合实验室进行, 采用反复水平加载, 加载装置如图 3 所示。顶面由 100t 往复作动器提供水平荷载, 加载点位于剪力墙顶部暗梁中心线位置, 距剪力墙底座 2 850mm。竖向荷载由 250t 油压千斤顶提供, 千斤顶与反力架采用滚轴支座连接, 为使竖向荷载均匀分布, 在竖向千斤顶与试件之间安装工字钢分配梁。

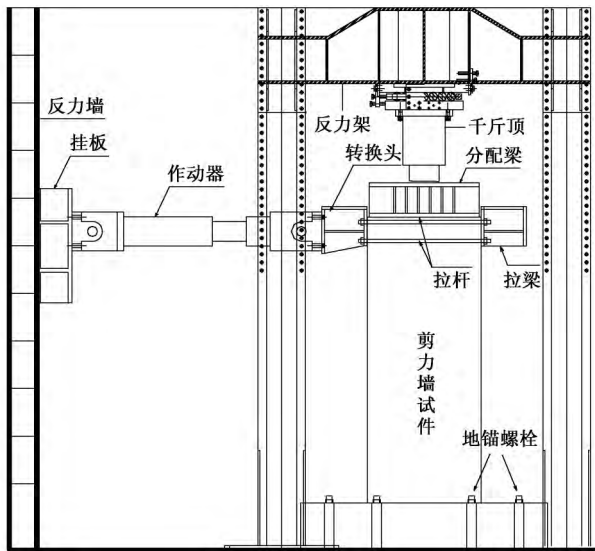


图 3 加载装置示意图

试验时先施加竖向荷载进行预加载, 使试件各部分充分接触并检查仪器可靠性。将仪器归零后, 加载至预定轴压力(1 500kN) 并在试验过程中保持此轴压力值恒定。水平加载方式为反复加载, 采用位移控制^[7] 加载制度如图 4 所示, 直至荷载下降至峰值荷载的 85% 时停止加载。

1.4 量测内容

在加载中心、墙身半高处、底座中心处布置传感器(D1 ~ D3) 来量测试件的位移及滑移, 在试件两端暗柱及剪力墙受力钢筋距底座 100mm 和 300mm 位

置处布置应变片(B1 ~ B16) 测点布置如图 5 所示。

2 试验结果及分析

2.1 试验现象及破坏形态

2.1.1 试件 W1 破坏过程

试件 W1 为现浇剪力墙, 加载初期, 试件外表无任何明显变化, 墙体处于弹性阶段。加载至位移角 1/1 100 时(对应荷载 185.20kN) , 墙体端部距底座 290mm 处出现 0.08mm 宽水平裂缝, 随着荷载增大, 裂缝逐渐向墙身扩展。加载到位移角 1/200 时, 墙体竖向受力钢筋屈服, 裂缝变深变宽, 底部水平裂缝最宽达 0.30mm。加载至位移角 1/120 时, 墙身底座受压混凝土出现压碎迹象, 墙身裂缝增多, 且集中分布于墙身下半部分。加载至位移角 1/51 时, 荷载达到峰值 431.71kN, 随加载位移角继续增大至 1/37, 荷载下降至 360.99kN, 同时墙身底部两端混凝土剥落严重, 受力钢筋弯曲外露, 试件破坏。

2.1.2 试件 W2 破坏过程

试件 W2 为叠合剪力墙, 相对于现浇剪力墙, 其

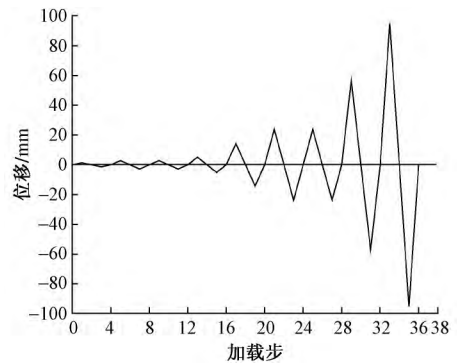


图 4 位移加载程序图

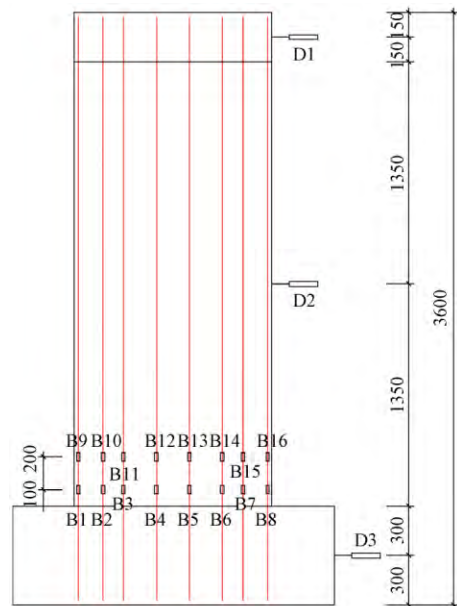


图 5 试验测点布置图

裂缝发展更早,加载至位移角 1/1 220 时(对应荷载 154.04kN),墙体端部距底座 300mm 处出现水平细微裂缝,裂缝宽 0.06mm。随着荷载增大,端部裂缝数目增多,加载至位移角 1/556 时(对应荷载 280.47kN),水平裂缝由端部扩展到剪力墙墙身,宽 0.13mm。荷载继续增大,一些水平裂缝逐渐延伸发展成弯剪斜裂缝,裂缝走向呈 45°。加载至位移角 1/234 时,墙身主要裂缝发展,变宽变长,裂缝最宽达 0.30mm,墙中受力钢筋屈服,剪力墙底部与底座水平连接处出现开裂。加载至位移角 1/120 时,端部混凝土出现少量剥落。加载至位移角 1/56 时,荷载达到峰值 538.68kN,墙身底部受压端混凝土压碎严重;反向加载至位移角 1/49 时,受压侧墙身底部混凝土被压碎,钢筋外露,承载力急剧下降,试件破坏。

对比试件 W1, W2 破坏形态及特征可知,两片剪力墙均经历弹性阶段、裂缝发展阶段和破坏阶段,裂缝主要分布于剪力墙下半部分,以受弯裂缝为主,伴有少量弯剪斜裂缝。两片剪力墙最终均发生弯曲破坏,破坏位置集中于剪力墙底部塑性铰形成部位,且以底部两端混凝土压碎、受力纵筋弯曲外露为特征。值得注意的是,试件 W2(叠合剪力墙)裂缝发展由现浇边缘暗柱延伸至中间叠合板,连续且不间断,说明预制带肋叠合板与现浇混凝土之间粘结良好,能有效地协同受力,整体性好。

2.2 滞回曲线和骨架曲线

试件的滞回曲线如图 7 所示,由图 7 可知,加载初期,两种试件的荷载-位移曲线成线性关系,残余变形很小,滞回环包围面积几乎为零,说明试件处于弹性工作阶段;随荷载增大,滞回环开始呈现梭形,残余变形和滞回面积增大,刚度退化逐渐明显,说明试件进入弹塑性阶段;两种试件滞回曲线后期没有呈现反“S”形,说明试件屈服后没有发生较大剪切

滑移。由图 7 还可知,试件 W1, W2 滞回环的饱满程度较为接近,试件 W1 “捏拢”现象略微明显,说明两种剪力墙耗能能力差异较小。

取荷载-位移曲线中各级第一循环的峰值点包络线作为剪力墙的骨架曲线,试件的骨架曲线如图 8 所示。由图 8 可知,两种剪力墙的骨架曲线基本呈现三折线形状。墙体开裂前,两片剪力墙骨架曲线基本呈直线,且重合在一起,说明均处于弹性工作阶段,且初始刚度差异小;开裂后,曲线开始弯折,随荷载增大,曲线弯折加剧,此时墙体已屈服,对比两种试件可知,开裂后,现浇剪力墙刚度下降更明显,承载力低于叠合剪力墙;接近破坏时,骨架曲线下降但近似水平,试件 W1 的下降水平段长于试件 W2 的,说明现浇剪力墙的延性较叠合剪力墙略好一点。

2.3 位移延性

剪力墙的位移延性系数 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$, 其中 Δ_u 为屈服位移, Δ_y 为极限位移;屈服位移根据试验中最外侧竖向受力钢筋达到屈服应变来确定,极限位移由荷载下降至峰值 85% 时所对应的位移来确定^[8]。此时的极限位移角可以用 $\theta = \Delta_u / H$ 计算,其中 H 为加载中心距底座的距离,即 2 850mm。试件 W1, W2 特征点位移值及延性系数和极限位移角值如表 2 所示。

试件特征点位移值及延性系数和极限位移角值比较 表 2

试件	开裂位移 Δ_{cr} / mm	屈服位移 Δ_y / m	峰值位移 Δ_m / m	极限位移 Δ_u / m	延性系数	极限位移角
W1	2.60	14.09	37.14	67.05	4.76	1/43
W2	2.33	12.18	41.14	56.48	4.64	1/50

由表 2 可知,叠合剪力墙的开裂位移、屈服位移、极限位移与现浇剪力墙相比略小,两者位移延性系数仅相差 2.5%,这表明虽然叠合剪力墙由于整体刚度较大,导致其变形能力不如现浇剪力墙,但仍具有良好的延性。

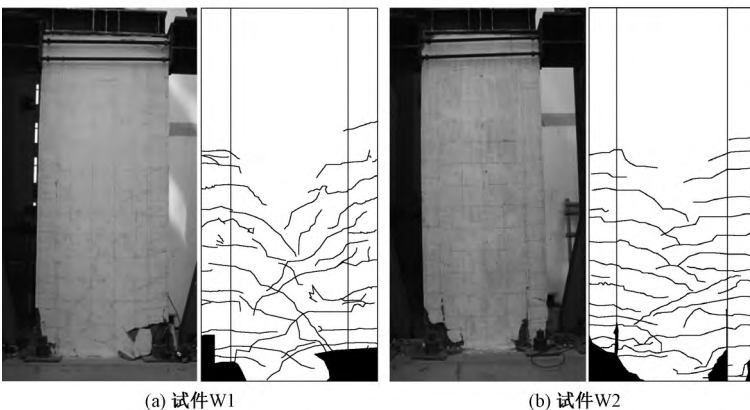


图 6 破坏形态及裂缝分布图

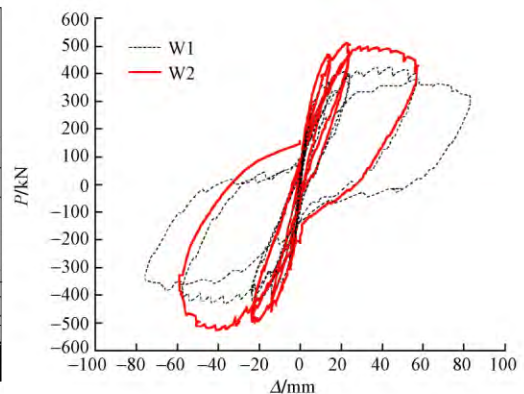


图 7 试件滞回曲线

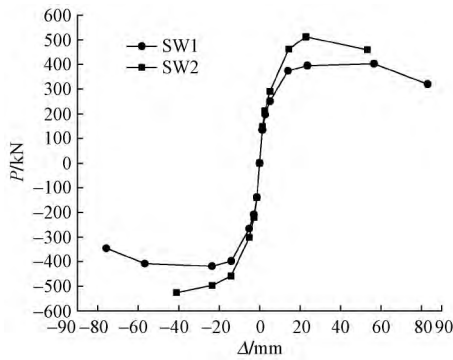


图8 骨架曲线

2.4 极限承载力分析

根据平截面假定,在轴力、弯矩共同作用下,沿墙体截面长度方向应力呈线性变化,由此可以根据力和弯矩的平衡方程求得名义区受压高度和截面有限高度的比值来判定大小偏心受压。根据试验现象及经验判断,两试件均为大偏压破坏。为简化计算,在承载力计算时,假定在 $1.5x$ 范围(x 为名义受压区高度)的受拉竖向分布钢筋达到屈服并参与受力^[9]。根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[10],无地震作用组合时叠合剪力墙按等同现浇剪力墙计算,计算公式为:

$$N = A_s f_y' - A_s f_y - N_{sw} + N_c \quad (1)$$

$$N(e_0 + h_0 - h/2) = A_s f_y' (h_0 - a_s') - M_{sw} + M_c \quad (2)$$

其中:

$$N_c = \alpha_1 f_c b x \quad (3)$$

$$M_c = \alpha_1 f_c b x (h_0 - x/2) \quad (4)$$

$$N_{sw} = (h_0 - 1.5x) b f_{yw} \rho_w \quad (5)$$

$$M_{sw} = (h_0 - 1.5x)^2 b f_{yw} \rho_w / 2 \quad (6)$$

式中: A_s' 、 A_s 分别为剪力墙暗柱受压、受拉钢筋截面面积; f_y' 、 f_y 、 f_{yw} 分别为剪力墙暗柱受压、受拉钢筋和墙身竖向分布钢筋强度实测值; f_c 为混凝土轴心抗压强度实测值; h_0 、 b 分别为剪力墙截面有效高度、宽度; ρ_w 为剪力墙竖向分布钢筋配筋率; x 为名义受压区高度; e_0 为偏心距; a_s' 为剪力墙受压区钢筋合力点到受压区边缘距离; α_1 为矩形受压区混凝土应力与混凝土轴心抗压强度设计值的比值,取值为1。

计算结果如表3所示,由表3可知,两种试件承载力试验值与计算值吻合良好,叠合剪力墙的受力性能与现浇剪力墙基本相当,叠合剪力墙承载力高于现浇剪力墙20%左右,这是由于叠合剪力墙两侧预制板混凝土采用C45,混凝土强度高,板中配置预应力螺纹肋钢丝,钢丝抗拉强度高,因此其承载力计算值及试验值均略高于现浇剪力墙。

试件计算值与试验值对比

表3

试件编号	计算值/kN	试验值/kN	计算值/试验值
W1	418.42	431.71	0.97
W2	479.87	526.13	0.92

2.5 刚度退化

图9给出的是拟静力试验中每个加载循环的峰值点处试件的割线刚度退化曲线。割线刚度 $K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|}$,其中 P_i 为第 i 次峰值点水平荷载值, Δ_i 为第 i 次峰值点水平位移值。

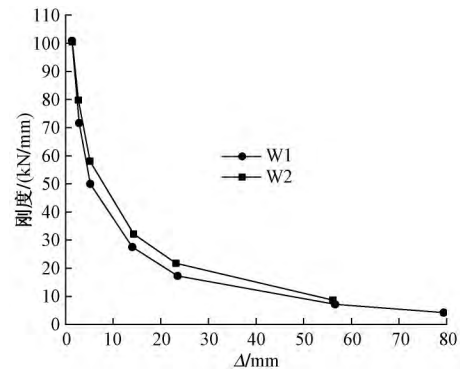


图9 刚度退化曲线

由图9可知,叠合剪力墙与现浇剪力墙呈现相似的刚度退化趋势,试件从开裂到屈服时的刚度退化显著,曲线下落快,进入屈服后,刚度退化减缓。现浇剪力墙屈服刚度约为开裂刚度的49%,而叠合剪力墙屈服刚度约为开裂刚度的54%,且刚度退化均匀,未出现突变,破坏时仍具有一定刚度,说明叠合剪力墙中两侧预制墙板与中间现浇层协同工作,共同参与结构受力,整体性好。在同一位移下,叠合剪力墙刚度均略高于现浇剪力墙,表明叠合剪力墙由于其两侧预制板采用了强度较高的混凝土从而增大了其整体刚度。

2.6 耗能性能

采用等效黏滞阻尼比 ξ_e 来衡量试件的耗能能力。计算等效黏滞阻尼比 ξ_e 的计算简图如图10所示,具体计算公式为:

$$\xi_e = \frac{1}{2\pi} \frac{S_{ABC} + S_{CDA}}{S_{\Delta OBE} + S_{\Delta ODF}} \quad (7)$$

计算了两种试件在不同加载特征点下的等效黏滞阻尼比,结果见表4。由表4可知,试件屈服前,等效黏滞阻尼比变化小,屈服后明显增大;叠合剪力墙的等效黏滞阻尼比在试件屈服前阶段略小于现浇剪力墙,而在试件屈服后阶段,则略微大于现浇剪力墙,两者差异较小。因此,叠合剪力墙的耗能能力与现浇剪力墙基本相当。

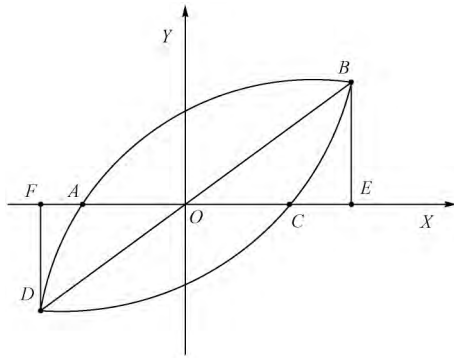


图 10 等效黏滞阻尼比计算简图

试件等效黏滞阻尼比 表 4

加载特征点	开裂	屈服	峰值	极限
W1	0.089	0.1	0.241	0.29
W2	0.044	0.091	0.264	0.308

3 结论

通过对 1 片足尺叠合剪力墙和 1 片足尺现浇剪力墙试件进行拟静力试验与分析,得出以下结论:

(1) 叠合剪力墙与现浇剪力墙均发生弯曲破坏,叠合剪力墙的极限承载力高于现浇剪力墙,两者破坏形态、裂缝发展过程类似。

(2) 叠合剪力墙的现浇层与两侧预制部分协同受力,两者未出现分离与剥落,整体性好。

(3) 叠合剪力墙与现浇剪力墙的滞回特性、位移延性、刚度退化及耗能能力等抗震性能指标相近,叠合剪力墙的整体刚度大于现浇剪力墙。

参 考 文 献

[1] 叶献国,张丽军,王德才,等. 预制叠合板式混凝土剪力墙水平承载力实验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(8): 1215-1218.

[2] 肖全东,郭正兴. 装配式混凝土双板短肢剪力墙拟静力试验[J]. 哈尔滨工业大学学报(自然科学版), 2014, 46(12): 84-88.

[3] 叶燕华,孙锐,薛洲海,等. 预制墙板内现浇自密实混凝土叠合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 138-144.

[4] SALMON D C, EINEA A, TADROS M K, et al. Full scale testing of precast concrete sandwich panels [J]. ACI Structural Journal, 1997, 94(4): 354-362.

[5] SALMON D C, TADROS M K, CULP T. A new structurally and thermally efficient precast sandwich panel system [J]. PCI Journal, 1994, 39(4): 90-101.

[6] 侯和涛,马天翔,叶海登,等. 波纹钢腹板预应力混凝土叠合板的抗弯性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(6): 42-45.

[7] 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.

[8] 魏威,叶燕华,王滋军,等. 新型钢筋混凝土叠合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 混凝土, 2011(6): 15-18.

[9] 曹万林,董宏英,胡国振,等. 不同暗支撑型式的带暗支撑双肢剪力墙抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(8): 18-25.

[10] 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, 2011.