

装配式混凝土双板短肢剪力墙拟静力试验

肖全东, 郭正兴

(东南大学 土木工程学院, 210096 南京)

摘要:为综合评价装配式混凝土双板短肢剪力墙的抗震性能,对2个双板装配式和1个现浇的足尺比例短肢剪力墙试件进行了拟静力试验研究,分析了试件的滞回曲线、骨架曲线、位移延性、承载能力、刚度退化和耗能能力.结果表明:3个试件均发生弯曲破坏;构造改进后的双板装配式剪力墙具有良好的整体工作性能;利用连续矩形螺旋箍筋加强U形筋搭接连接范围混凝土的约束作用,能提高双板装配式短肢剪力墙的刚度和承载能力;双板装配式短肢剪力墙具有与现浇剪力墙相近的位移延性和刚度退化,具有良好的耗能能力.

关键词: 装配式混凝土双板短肢剪力墙; 拟静力试验; 承载力; 延性; 耗能

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2014)12-0084-05

Quasi-static test for double-wall precast concrete short-leg shear walls

XIAO Quandong, GUO Zhengxing

(School of Civil Engineering, Southeast University, 210096 Nanjing, China)

Abstract: To comprehensively evaluate the seismic behavior of double-wall precast concrete (DWPC) short-leg shear walls, quasi-static test of two full-scale DWPC short-leg shear walls and one normal cast-in-situ (CIS) short-leg shear wall were carried out. Systematic analyses were made on hysteretic curves, skeleton curves, displacement ductility, bearing capacity, stiffness degradation and energy dissipation capacity of specimens. The result shows that all specimens fail in bending. The detail improved DWPC short-leg shear walls can work together well. The continuous rectangular spiral stirrups in the range of U-shaped connection steel bars confine the concealed column concrete; also improve the stiffness and bearing capacity of DWPC short-leg shear walls. The displacement ductility, stiffness degradation and energy dissipation capacity of DWPC short-leg shear walls are close to those of CIS short-leg shear wall.

Keywords: double-wall precast concrete short-leg shear wall; quasi-static test; bearing capacity; ductility; energy dissipation

装配式混凝土双板结构体系(double-wall precast concrete building system, DWPC),设计简单,工厂生产高度自动化,施工现场方便快捷,对环境影响小,资源节约,在欧洲是一项成熟的技术.其钢筋骨架采用焊接钢筋网和格构式钢筋桁

架,预制分两阶段进行:首先在布置好钢筋骨架的钢模具上浇筑一侧混凝土壁板并养护成型;再通过翻板机将养护好的混凝土板露钢筋骨架一侧压在新浇筑另一侧板的混凝土上,在工厂养护成型.施工安装时浇筑两侧预制混凝土壁板间的中空区域,形成双板剪力墙.通过在中空区域布置连接钢筋和后浇混凝土将双板墙、叠合楼板及节点等形成整体共同构建装配式混凝土双板剪力墙(double-wall precast concrete shear wall, DWPC)结构体系.

装配式混凝土剪力墙已成为装配式混凝土结构中的研究热点. Kurama 等^[1-2] 针对采用预应力

收稿日期: 2014-03-17.

基金项目: 国家科技支撑计划(2011BAJ10B03); 江苏省普通高校毕业生科研创新计划(CXLX13_105); 中央高校基本科研业务费专项资金(2242014Y10030); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2014127-05).

作者简介: 肖全东(1981—),男,博士研究生;
郭正兴(1956—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 郭正兴, guozx195608@126.com.

混合装配的剪力墙进行了试验研究和理论分析, 结果表明预应力混合装配剪力墙具有良好的抗震性能。蔡小宁等^[3]对预应力混合装配短肢剪力墙进行了研究, 结果表明其极限承载力得到提高。在非预应力装配式短肢剪力墙方面, 朱张峰等^[4]对 NPC 短肢剪力墙进行了试验研究, 结果表明 NPC 短肢剪力墙初始刚度大, 抗震性能和现浇相近。针对 DWPC 剪力墙, 连星等^[5]进行了抗震性能研究, 得出了 DWPC 剪力墙与现浇剪力墙具有相近承载力和耗能能力的结论, 但对 DWPC 短肢剪力墙的研究未见相关报道。

为了解 DWPC 短肢剪力墙的整体工作性能和抗震性能并为工程应用提供科学依据, 以宿迁某 11+1 层装配整体式住宅试验示范项目为背景, 制作 1 个现浇对比试件和 2 个 DWPC 试件进行拟静力试验, 对短肢剪力墙试件的滞回曲线、骨架曲线、位移延性、刚度退化和耗能能力进行了研究。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

试验设计制作了 3 个短肢剪力墙足尺比例试件, 其中 SW1 为普通全现浇短肢剪力墙试件, SW2 和 SW3 为 DWPC 短肢剪力墙试件, 试件由底座、剪力墙和加载梁组成。其中底座截面 $700\text{ mm} \times 640\text{ mm}$, 剪力墙截面 $1\ 000\text{ mm} \times 200\text{ mm}$, 剪力墙高 $3\ 200\text{ mm}$, 加载梁截面 $240\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 。混凝土强度等级为 C35, 受力钢

筋采用 HRB400 级钢筋。3 个剪力墙配筋率基本相同, 水平钢筋配筋率为 0.39% , 竖向钢筋配筋率为 1.08% , 装配式试件比现浇试件钢筋用量多约 39.35 kg 。

试验对 DWPC 试件进行了构造改进: 剪力墙最外边缘的两根竖向钢筋使用平面桁架形式; 竖向受力钢筋采用在剪力墙两侧预制板之间的现浇混凝土布置 U 形筋搭接连接; 在暗柱区竖向钢筋 U 形筋搭接连接范围加设一连续矩形螺旋箍筋。各试件的尺寸和配筋如图 1 所示。试件在江苏元大建筑科技有限公司完成加工制作。

1.2 试验加载装置及加载方案

试件在基本恒定竖向荷载作用下, 施加水平低周反复荷载进行拟静力试验。水平加载设备为 $1\ 500\text{ kN}$ 液压伺服控制系统 (MTS), 竖向加载设备为两台 600 kN 穿心式千斤顶 (YC-60)。

试验时, 利用地脚螺杆穿过底座预留锚固孔将试件锚固在试验室地面上; 通过两台手动千斤顶把试件底座夹紧, 防止试件在试验过程中出现水平方向滑移; 同时在试件两侧设置防侧移装置, 防止试件在加载过程中发生平面外倾斜。试验加载装置见图 2。

试验开始前, 竖向荷载分三级通过穿心式千斤顶张拉钢绞线方式施加, 轴压比控制为 0.10 , 施加总压力为 468 kN 。在试验过程中, 安排专人操作油泵调节油压, 使千斤顶配套精密油压表读数基本保持恒定, 轴力在试验过程仅发生微小变化。

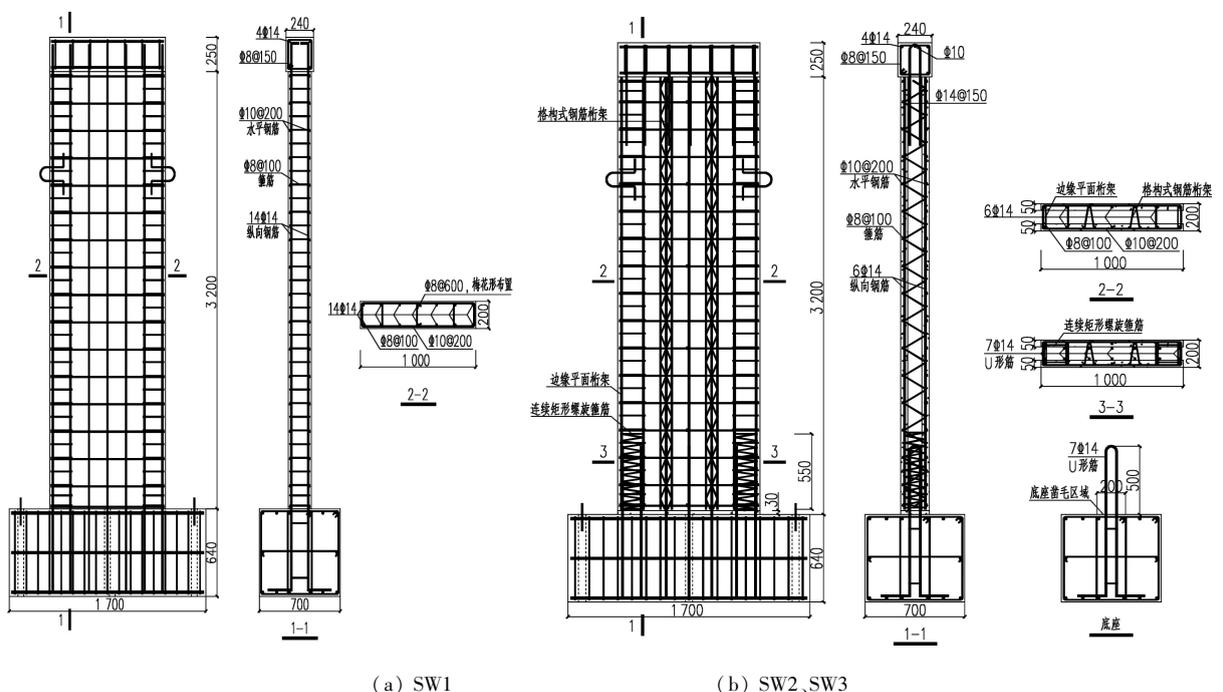


图 1 试件配筋示意

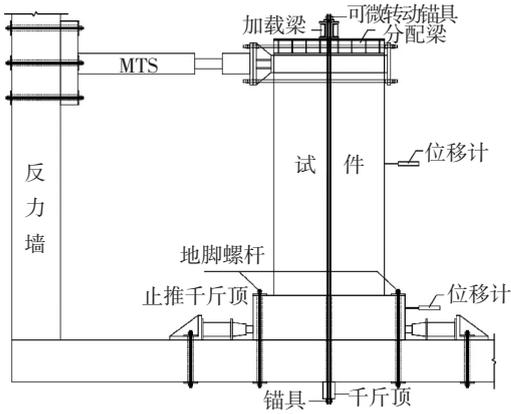


图2 加载装置示意

待轴压稳定后,施加水平双向反复荷载,加载分两个阶段:屈服前采用力控制加载,每级循环1次;屈服后采用位移控制加载,每级循环3次^[6]。试验过程中约定 MTS 外推时为正,内拉时为负。

2 试验现象与结果

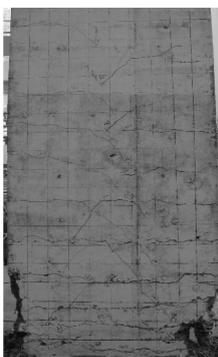
试验表明,DWPC 短肢剪力墙从开始加载到破坏的全过程分为3个阶段:弹性阶段、带裂缝工作阶段和破坏阶段。在试验过程中,加载梁和剪力墙始终共同工作,未发生开裂。各试件裂缝开展及破坏过程分述如下:

SW1 加载初期,荷载和位移呈线性变化,卸载后残余变形很小,处于弹性阶段;到荷载绝对值等于 90 kN 加载周期,剪力墙试件在距底座约 630 mm 高处出现水平裂缝,试件进入开裂阶段;到荷载绝对值等于 150 kN 加载周期,试件纵向受力钢筋屈服,试件进入屈服阶段,顶点推、拉方向最大位移的平均值约为 25 mm,试件屈服位移取 $\Delta_y = 25$ mm。之后进入位移控制加载阶段,加载到 $2\Delta_y$ 周期时,剪力墙与底座水平连接处出现裂缝;加载到 $4\Delta_y$ 周期时,荷载达到峰值 215.39 kN,剪力墙根部混凝土压区开始剥落;加载到 $5\Delta_y$ 周期时,剪力墙根部混凝土压碎严重,箍筋外露,竖向钢筋拉断,试件宣告破坏,试验结束。

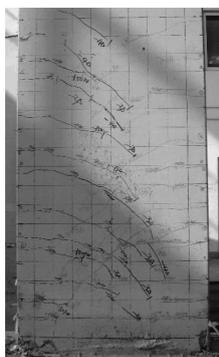
SW2 加载初期,荷载和位移呈线性变化,卸载后残余变形很小,处于弹性阶段;到荷载绝对值等于 90 kN 加载周期,剪力墙试件在距底座约 600 mm 高处出现水平裂缝,试件进入开裂阶段;到荷载绝对值等于 150 kN 加载周期,试件纵向受力钢筋屈服,试件进入屈服阶段,顶点推、拉方向最大位移的平均值约为 20 mm,试件屈服位移取 $\Delta_y = 20$ mm。之后进入位移控制加载阶段,加载到 $2\Delta_y$ 周期时,剪力墙与底座水平座浆层出现裂缝;加载到 $5\Delta_y$ 周期时,荷载达到峰值 218.05 kN,剪力墙根部混凝土压区开始剥落;进入加载 $6\Delta_y$ 周期,当加载 $6\Delta_y$ 第一个循环负向(拉)时,连接钢筋拉断,试件承载力急速下降,试件宣告破坏,试验结束。

SW3 加载初期,荷载和位移呈线性变化,卸载后残余变形很小,处于弹性阶段;到荷载绝对值等于 90 kN 加载周期,剪力墙试件在距底座约 780 mm 高处出现水平裂缝,试件进入开裂阶段;到荷载绝对值等于 150 kN 加载周期,试件纵向受力钢筋屈服,试件进入屈服阶段,顶点推、拉方向最大位移的平均值约为 20 mm,试件屈服位移取 $\Delta_y = 20$ mm。之后进入位移控制加载阶段,加载到 $3\Delta_y$ 周期时,剪力墙与底座水平座浆层出现裂缝;加载到 $5\Delta_y$ 周期时,荷载达到峰值约 228.83 kN,剪力墙根部混凝土压区开始剥落;进入加载 $6\Delta_y$ 周期,当加载 $6\Delta_y$ 第一个循环负向(拉)时,连接钢筋拉断,试件承载力急速下降,试件宣告破坏,试验结束。

3个试件的最终裂缝开展情况见图3。根据上述试验现象,可以判断各试件的破坏形态相同,均为弯曲破坏,表现为剪力墙两侧底部混凝土压碎剥落,竖向钢筋(现浇试件)或连接钢筋(装配式试件)拉断(见图4)。双板装配式试件内外侧预制混凝土板和中间现浇混凝土构成整体共同工作,未发生分离(见图4(b)、(c))。



(a) SW1



(b) SW2



(c) SW3

图3 试件裂缝开展

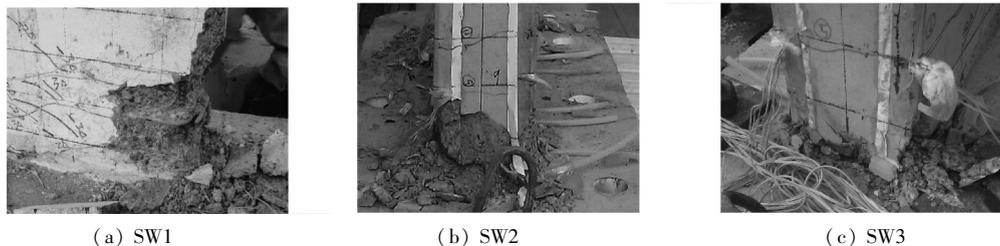


图 4 试件破坏形态

3 试验结果分析

3.1 滞回曲线与骨架曲线

各试件顶端荷载-位移滞回曲线、骨架曲线见图 5。

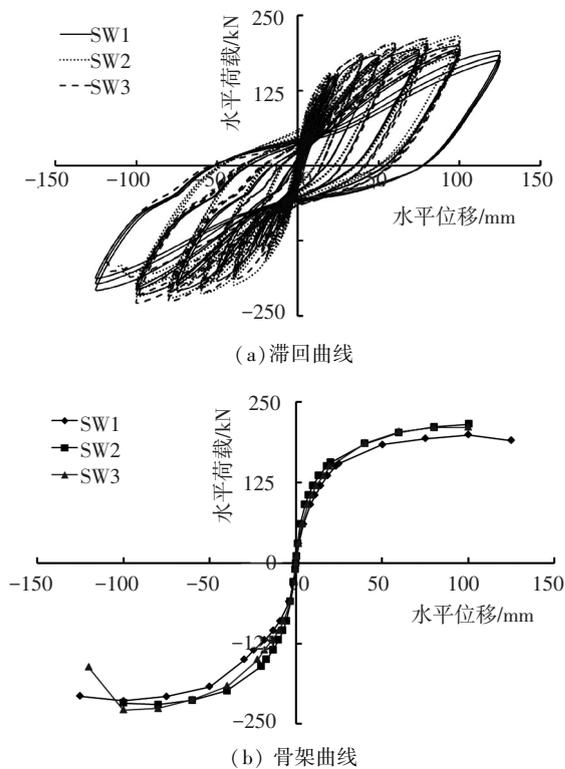


图 5 试件滞回曲线与骨架曲线

对比各试件滞回曲线,具有如下共性:在试件屈服前,滞回环狭长,面积很小,处于稳定发展阶段;屈服后,滞回环面积逐渐增大,但耗能能力仍不大;随着加载位移的增大,滞回环有向反“S”型过度的趋势,面积明显增大,表明了较好的耗能能力;在同一位移级别下,二、三次循环与第一次循环相比,强度和刚度均有明显退化;滞回环形状较饱满,未出现明显“捏缩”现象,表现出良好的耗能能力^[7]。

分析试件骨架曲线可发现,各试件骨架曲线走势基本一致,表现出相近的发展规律,在低周反复荷载作用下都经历了弹性、开裂、屈服、极限和破坏等几个阶段;各骨架曲线均经历一个较平缓阶段,说明后期试件承载力下降缓慢、位移延性较好,有利于抗震;除试件 SW1 由于剪力墙根部混凝土破坏严重导致承载力下降而产生下降段外,其余两个 DWPC 试件都没有明显的下降段。

3.2 变形能力及承载力

延性是反映结构或构件塑性变形能力的重要指标,也是衡量结构抗震性能的指标之一.各试件特征点及延性比较见表 1.其中,屈服位移 Δ_y 根据试验过程中纵向受力钢筋达到屈服应变来确定。

分析表 1 可知:

1) 双板装配式试件的开裂位移、屈服位移和极限位移与现浇试件的相比较小.开裂位移减小约 20.5%~37.7%,屈服位移和极限位移减小约 20%.由于本次试验的双板装配式试件在暗柱区竖向钢筋搭接连接范围加设连续矩形螺旋箍筋,加强了该区域混凝土的约束作用,提高了双板装配式试件的刚度,降低了其变形能力。

2) 3 个试件的位移延性系数相同,SW1 极限位移角为 1/26.6,SW2、SW3 的极限位移角为 1/33.25.表明双板装配式试件虽然由于刚度的提高导致变形能力有所降低,但仍具有良好的延性和抗倒塌能力。

3) 双板装配式试件与现浇试件开裂荷载和屈服荷载相同,极限荷载提高约 1.2%~6.2%.这也是因为双板装配式试件在暗柱区竖向钢筋搭接连接范围加设连续矩形螺旋箍筋所致.在试验中,开裂荷载由混凝土开裂控制,屈服荷载由纵向受拉钢筋屈服控制,而极限荷载则由混凝土和钢筋共同控制.连续矩形螺旋箍筋对暗柱核心区混凝土的约束直接提高了构件的承载力。

表 1 试件特征点荷载、位移及延性系数比较

试件	开裂荷载 F_{cr}/kN	开裂位移 Δ_{cr}/mm	屈服荷载 F_y/kN	屈服位移 Δ_y/mm	极限荷载 F_u/kN	极限位移 Δ_u/mm	位移延性 系数 δ	极限位移角 θ_u/rad
SW1	90	8.73	150	25	215.39	125	5	1/26.60
SW2	90	5.44	150	20	218.05	100	5	1/33.25
SW3	90	6.94	150	20	228.83	100	5	1/33.25

3.3 刚度退化

根据试验结果计算试件在各级循环荷载下的平均刚度 $K^{[6]}$, 各试件的刚度退化曲线见图 6.

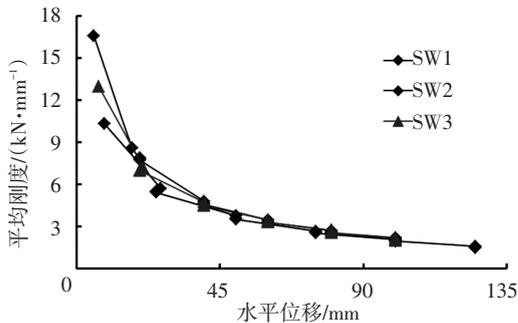


图 6 刚度退化曲线比较

由图 6 可以看出:

1) 3 片剪力墙在整个试验过程中刚度退化明显. 剪力墙的刚度退化主要集中在加载前期, 从开裂到屈服时的刚度退化更明显, 试件进入屈服后刚度退化缓慢.

2) 现浇试件 SW1 的屈服刚度约为开裂刚度的 55.0%, 双板装配式试件 SW2、SW3 的屈服刚度约为开裂刚度的 52.1%~55.6%, 两者刚度退化基本相同, 说明双板装配式试件的两侧预制墙板与中间现浇混凝土构成整体, 完全参与结构受力.

3) 双板装配式试件 SW2、SW3 的刚度退化曲线始终在现浇试件 SW1 的之上, 表明双板装配式试件刚度较大. 这是因为双板装配式试件在暗柱区竖向钢筋搭接连接范围加设连续矩形螺旋箍筋, 提高了暗柱区混凝土的约束作用, 使双板装配式试件刚度相对较高, 并且减缓了其后期刚度退化.

3.4 耗能能力

结构耗散能量的能力以一周滞回环所包围的面积来衡量^[7]. Jacobsen^[8] 在 1930 年提出了等效粘滞阻尼系数的概念, 等效粘滞阻尼系数 h_e 的大小成为工程抗震中衡量结构耗能能力的重要指标. 本文计算了 3 个试件在不同加载特征点下的等效粘滞阻尼系数, 结果见表 2.

表 2 不同加载特征点下各试件等效粘滞阻尼系数

加载特征点	SW1	SW2	SW3
开裂荷载阶段	0.07	0.07	0.08
屈服荷载阶段	0.05	0.06	0.05
极限荷载阶段	0.12	0.17	0.16

从表 2 可以看出, 试件屈服前, 各试件等效粘滞阻尼系数变化较小, 屈服后明显增大; 双板装配式试件的等效粘滞阻尼系数在屈服阶段(含)前与现浇试件的基本相同, 而在试件屈服之后, 则大于现浇的等效粘滞阻尼系数. 因此, 双板装配式试件 SW2 和 SW3 的耗能能力不低于现浇试件 SW1.

4 结 论

通过两个 DWPC 短肢剪力墙试件和一个普通全现浇短肢剪力墙试件在较小轴压比(0.1)下的拟静力试验, 对试验现象和结果进行分析, 得到以下结论:

1) 各试件破坏形式相同, 均为弯曲破坏. 现浇试件破坏时竖向受力钢筋拉断, 装配式混凝土双板短肢剪力墙试件破坏时竖向连接 U 形筋拉断, U 形筋与竖向钢筋搭接连接良好.

2) 在试验过程中, DWPC 试件内、外侧预制混凝土板与中间现浇混凝土没有出现分离与剥落, 体现良好的整体工作性能.

3) 装配式混凝土双板短肢剪力墙试件在暗柱区竖向钢筋搭接连接范围加设连续矩形螺旋箍筋, 提高了剪力墙的刚度和极限承载力, 降低了其变形能力, 同时具有良好的延性, 其耗能能力不低于现浇试件.

4) 装配式混凝土双板短肢剪力墙与现浇混凝土短肢剪力墙具有相近的抗震性能. 利用 U 形筋对竖向钢筋进行搭接连接是可行的, 边缘平面桁架的使用能保证装配式混凝土双板剪力墙的整体工作性能.

参 考 文 献

- [1] KURAMA Y, SAUSE R, PESSIKI S, et al. Seismic response evaluation of unbonded post-tensioned precast walls [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(5): 641-651.
- [2] KURAMA Y, SHEN Q. Post-tensioned hybrid coupled walls under lateral loads [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 297-309.
- [3] 蔡小宁, 孟少平, 陈佳佳, 等. 预应力预制混合装配短肢墙受力性能分析 [J]. 工业建筑, 2011, 41(1): 73-76, 92.
- [4] 朱张峰, 郭正兴. 装配式短肢剪力墙平面模型抗震性能试验 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(4): 94-99.
- [5] 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): 105-109.
- [6] JGJ101—96 建筑抗震试验方法规程 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [7] 唐久如. 钢筋混凝土框架节点抗震 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1989.
- [8] JACOBSEN L S. Steady forced vibrations as influenced by damping [J]. ASME Transactions, 1930, 52: 169-181.

(编辑 赵丽莹)