

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.11.007

足尺钢骨混凝土剪力墙抗震性能试验研究

刘平^{1,2}, 王可¹, 张健新^{1,2}, 王志鑫³

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401;
3. 滨州学院 建筑工程学院, 山东 滨州 256600)

摘要:为探究不同剪跨比下钢骨对足尺剪力墙结构抗震性能的影响,设计了一种适用于超高层建筑物的钢骨-栓钉-混凝土剪力墙形式,进行 2 个足尺钢骨混凝土剪力墙和 2 个钢筋混凝土剪力墙的低周往复荷载试验,对比分析试件的滞回曲线、刚度退化、耗能能力等抗震性能指标。研究表明:剪力墙试件剪跨比较大时,试件发生弯曲破坏;剪跨比较小时,试件发生剪切破坏。相较于钢筋混凝土剪力墙试件,钢骨的加入,减缓了试件裂缝的发展,降低了试件破坏程度,剪力墙试件的承载力、变形能力、延性、整体刚度和耗能能力都得到提高。剪跨比较小的剪力墙试件承载力更大,初始刚度、耗能能力明显增强,但延性较低。钢骨、栓钉、混凝土协同工作能力良好。

关键词:钢骨混凝土;剪力墙;抗震性能;剪跨比;足尺试验;往复荷载

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)11-056-08

Experimental research on seismic behavior of full-scale steel reinforced concrete shear wall

LIU Ping^{1,2}, WANG Ke¹, ZHANG Jianxin^{1,2}, WANG Zhixin³

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China; 2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, P. R. China; 3. School of Architecture Engineering, Binzhou University, Binzhou 256600, Shandong, P. R. China)

Abstract: In order to explore the influence of steel on the seismic performance of full-length shear wall structure under different shear span ratio, a new form of steel-bolt-concrete shear wall is designed for super-high-rise buildings. Two full-scale steel reinforced concrete shear walls and two reinforced concrete shear walls were tested under low cyclic loading for comparison of hysteretic curve, stiffness degeneration and energy dissipation between them. The results show that bending failure occurs when the shear wall specimen has a large shear span ratio, while shear failure occurs when the shear span ratio is small. Compared with the reinforced concrete shear wall specimens, the shear walls with steel present slower development of cracks and slighter damage degree. The bearing capacity, deformation capacity, ductility, overall stiffness and energy dissipation capacity of shear wall specimens reinforced with steel have been

收稿日期: 2019-09-04

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2018202290, E2017202278); 滨州学院科研基金资助项目(BZXYLG1921)。

Supported by the Hebei Natural Science Foundation-funded Project (E2018202290, E2017202278) and Binzhou University Research Fund Project (BZXYLG1921).

作者简介: 刘平(1980—),男,高级工程师,博士,主要从事结构抗震研究,(E-mail)2002lp@163.com。

improved. The shear wall specimens with small shear span ratio have higher bearing capacity, initial stiffness and energy dissipation capacity but the ductility is low. The steel, bolts and concrete work well together.

Keywords: steel reinforced concrete; shear wall; seismic behavior; shear span ratio; full-scale test; cyclic load

钢骨混凝土剪力墙综合了混凝土与型钢的优点,具有强度高、防火等优势。近年来,国内外学者针对钢骨混凝土剪力墙进行了研究。Hossain 等^[1-2]对中间填充混凝土的两侧钢板组合剪力墙试件进行了试验研究。Sigariyazd 等^[3]进行了 3 块 1/3 薄钢板剪力墙试验。Safari 等^[4]设计了多个复合钢骨剪力墙,进行了低周往复的加载试验并进行了数值分析。王晓燕等^[5]完成了对 6 个“一”字形截面钢骨高强混凝土短肢剪力墙试件的低周反复荷载试验。纪晓东等^[6]完成了 2 个内嵌钢骨混凝土墙试件和 3 个外包钢板混凝土墙试件的拟静力试验。马恺泽等^[7]对 4 个双层钢板混凝土组合剪力墙试件进行了拟静力加载试验。黄强^[8]、Cui^[9]等进行了 9 个轻钢 EPS 混凝土剪力墙的拟静力试验。任重翠等^[10]进行了 11 片剪力墙的低周往复拉剪试验,得出轴拉力等对剪力墙抗震性能的影响。王滋军等^[11]提出一种新型预制叠合剪力墙结构,墙体设计为上下两层。王萌等^[12]等用有限元软件 ABAQUS 模拟验证了钢骨剪力墙受力性能,并对常见形式的钢骨剪力墙进行了系统的对比分析。Huang 等^[13]对混凝土-双层钢板剪力墙进行了非线性有限元分析和多参数对比。Peng 等^[14]简化分析了 6 个在循环荷载下再生混凝土剪力墙的抗震性能。目前试验研究多针对于低矮的缩尺模型,对足尺钢骨剪力墙的研究还不够深入和系统。针对试件缩尺与足尺之间会产生尺寸效应,刘春晖等^[15]开展了再生混合混凝土受压尺寸效应以及外置薄钢板再生混合墙抗震性能方面的探讨。但这些探索缺乏对足尺剪力墙抗弯能力、抗剪能力对比分析。对此,文中进行了足尺钢骨混凝土剪力墙和钢筋混凝土剪力墙进行低周反复荷载下的抗弯抗剪试验研究。

1 试验概况

试验共设计了 4 个截面尺寸相同的足尺剪力墙试件。根据《高层建筑混凝土结构技术规程》和《组合结构设计规范》承载力计算的比较分析,按照试验目的要求,并参考工程设计实践,试件采取下列原则设计:

1) 混凝土剪力墙两端的纵筋产生的抗弯力矩,等同于钢骨剪力墙试件相同范围的型钢与附加纵筋产生的抗弯力矩。

2) 为使抗剪试验成功,剪跨比较小的 2 个试件适当增加配置纵向钢筋。

3) 试件内钢筋满足构造配置。

4) 墙内竖向分布筋均采用 12@200。

其中 SRC1 与 SRC2 为钢骨混凝土剪力墙, SRC1 高度为 3 000 mm, 剪跨比为 3, SRC2 高度为 1 500 mm, 剪跨比为 1.5。试件 SRC1 和试件 SRC2 在墙截面中部设置工字型型钢, 钢骨腹板厚 8 mm, 翼缘厚 16 mm, 腹板翼缘都焊接栓钉, 其水平间距为 200 mm, 竖向间距为 300 mm, RC1 与 RC2 为普通钢筋混凝土剪力墙, RC1 高度为 3 000 mm, 剪跨比为 3, RC2 高度为 1 500 mm, 剪跨比为 1.5。试件截面两端分别设有不同尺寸的暗柱, 所有试件均为立式现浇。各试件的墙截面尺寸及配筋情况如图 1 所示。

试件中的钢板均采用 Q345 钢。钢板、钢筋材料性能试验结果如表 1 所示。混凝土等级均为 C40, 混凝土立方体抗压强度平均值为 42.2 MPa, 轴心抗压强度平均值为 28.3 MPa。

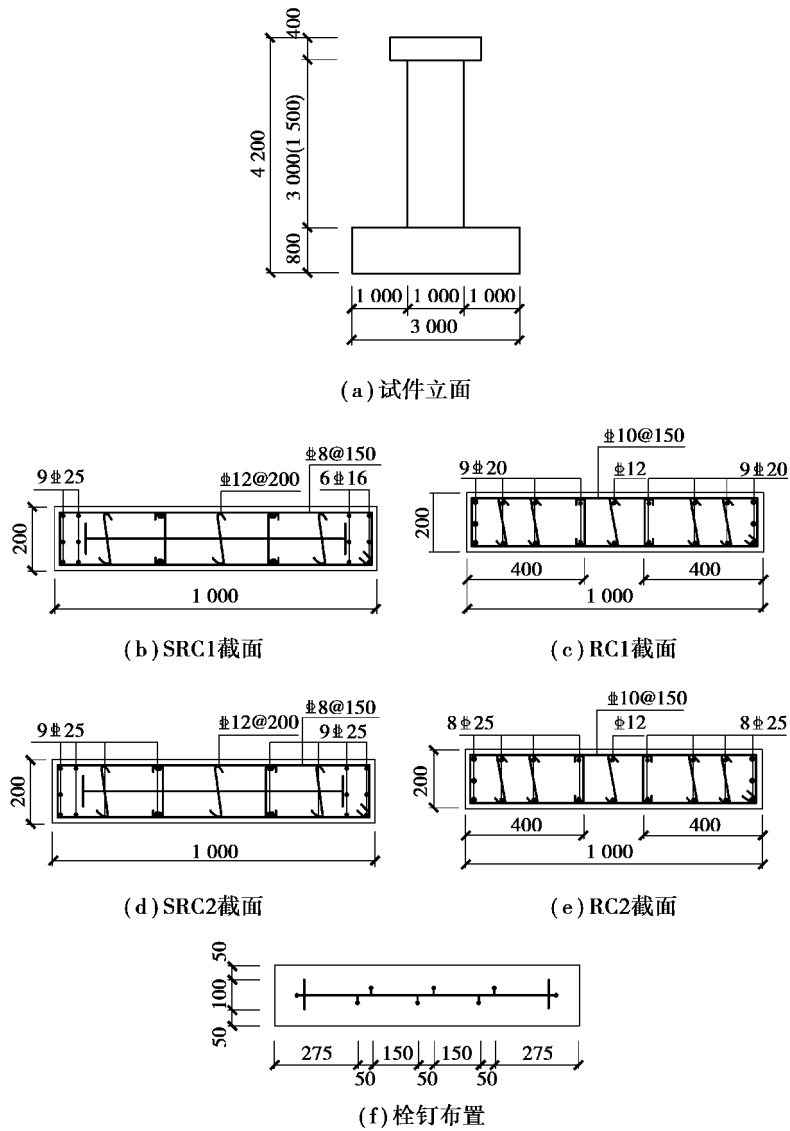


图 1 试件几何尺寸与截面图

Fig. 1 Details of specimen

表 1 钢材性能

Table 1 Material properties of steel

钢筋/钢板等级	钢筋直径/钢板厚度/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
HRB400	8	425.1	626.0
HRB400	10	471.4	596.9
HRB400	12	458.2	623.1
HRB400	16	443.3	610.7
HRB400	20	420.0	587.2
HRB400	25	445.0	632.3
Q345	8	445.6	561.4
Q345	16	489.1	540.5

试验装置主要由反力墙、水平推拉作动器、油压控制系统和地锚螺杆等组成。水平千斤顶固定在反力墙上,水平加载点位于加载头截面中心位置。本次试验针对超高层建筑,试验设计时,考虑到试件尺寸大,强度高,剪力墙试件承受轴向压力后,抗弯、抗剪承载力会提高,当前实验室设备最大水平推力为 1 000 kN,无法顺利完成预期试验目标。再三考虑后,决定舍弃轴压比这一参数的对比,决定试验以后通过有限元模拟进行对比分析轴压比的影响,故未加竖向荷载。加载装置示意如图 2 所示。采用拟静力试验方法对试件进行低周往复荷载试验。加载制度为荷载-位移混合控制,试件屈服前采用荷载控制,每级正负向循环加载一次,RC1 每级荷载为 60 kN,RC2 为 80 kN, SRC1 为 60 kN, SRC2 为 80 kN。当剪力墙根部截面处钢板钢筋应变达到屈服应变时,记录此时的位移,并作为之后位移控制的加载步距,接下来采用位移控制进行加载,每级循环两次。RC1、RC2、SRC1、SRC2 的每级加载步距分别是 46、20、36、25 mm。当试件水平荷载下降到极限荷载的 85% 以下时,认为试件破坏。

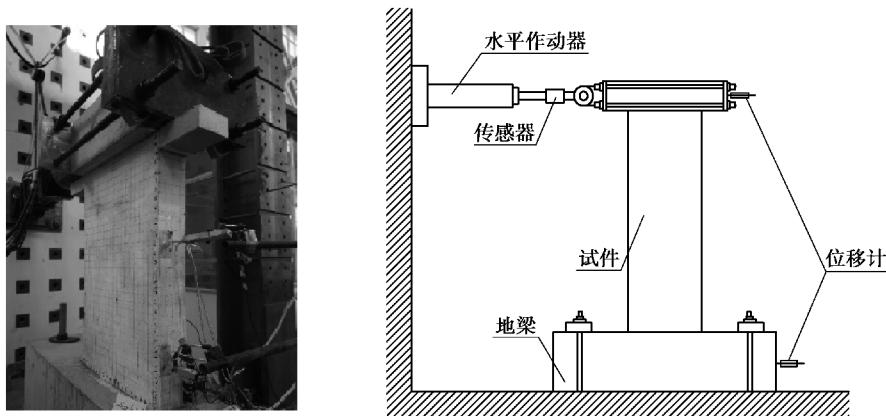


图 2 加载装置示意图

Fig. 2 Test setup

2 破坏特征

足尺混凝土剪力墙试件试验现象和破坏发展过程相似。其中 RC1 与 SRC1 发生弯曲破坏, RC2 与 SRC2 发生剪切破坏。试件破坏形态如图 3 所示,其中 SRC2 墙因实验室条件限制未达到极限承载能力状态。

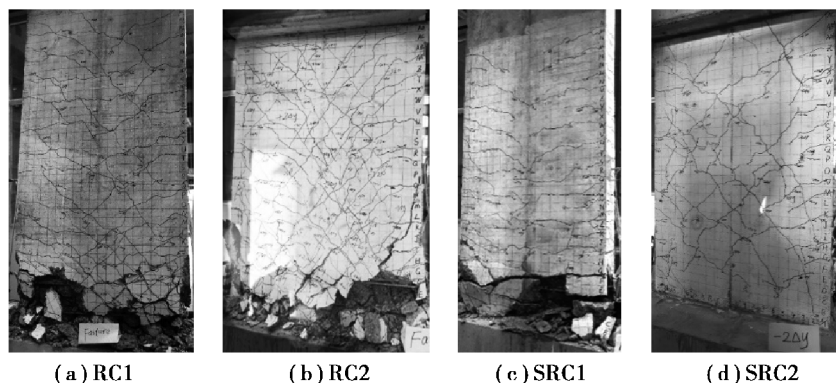


图 3 破坏形态

Fig. 3 Failure pattern

试验过程显示,在初始开裂阶段,试件均产生弹性变形,墙脚正面侧面均出现许多微小水平裂缝。随着荷载的逐渐增加,水平裂缝不断伸长开展,并伴随出现着许多斜裂缝。当钢筋或钢板屈服后,试件进入弹塑

性阶段,裂缝继续开展,宽度变大,长度逐渐贯通墙面,并产生交叉贯通裂缝,受压区混凝土开始龟裂,混凝土保护层开始剥落。当试件达到最大承载能力后,荷载不再上升,随着试件变形增大,纵筋屈曲或者拉断,钢板焊缝崩开,墙脚混凝土被压碎,试件破坏。

试验过程中,足尺钢骨混凝土剪力墙试件 SRC1 和 SRC2 分别比足尺钢筋混凝土剪力墙 RC1 和 RC2 裂缝出现更晚,裂缝细小并且开展较慢,最终破坏时贯穿裂缝较少,混凝土压溃情况较轻, SRC1 破坏前,钢骨焊缝处出现断裂;不含钢骨的足尺试件 RC1 和 RC2 裂缝宽度大、开展迅速,破坏时混凝土压溃较为严重,并伴随着钢筋的拉断。剪跨比大的足尺试件 SRC1 和 RC1 开裂过程中,受弯产生的横向裂缝较多,裂缝宽度较大,试件极限变形较大;剪跨比小的足尺试件 SRC2 和 RC2 产生较多的斜向剪切裂缝,裂缝宽度较小,裂缝逐渐交叉贯通开展,破坏时极限位移较小。试验过程中,因试件 SRC2 加载二倍屈服位移时,其荷载超出实验室作动器最大量程,故停止试验。从试验结果看出,钢骨减缓了裂缝的发展,减小了裂缝的宽度,试件破坏时混凝土压溃情况较轻,但是出现了焊缝断裂的情况。

3 试验结果分析

3.1 承载力、位移及延性

数据分析时采用能量等值法确定屈服点,并记录此时的位移为屈服位移。极限荷载即为试件在加载过程中所能承受的最大水平力,此时位移为极限位移;当试件承载力下降至极限荷载的 85% 时,记为破坏荷载,此时的位移为破坏位移。足尺混凝土剪力墙试件的荷载、位移、位移延性系数见表 2 所示。

表 2 承载力、位移及延性系数

Table 2 Bearing capacity, displacement and ductility coefficient of specimens

试件	加载方向	屈服位移/ mm	屈服荷载/ kN	极限位移/ mm	极限荷载/ kN	破坏位移/ mm	破坏荷载/ kN	延性系数
RC1	正向	64.23	316.52	90.00	328.10	167.05	278.89	2.60
RC1	负向	50.65	277.31	135.97	317.60	143.65	269.69	2.84
RC1	平均	57.44	296.92	112.99	322.85	155.53	274.42	2.72
RC2	正向	38.43	696.05	70.56	810.00	82.04	688.50	2.13
RC2	负向	37.01	674.20	75.03	746.10	79.11	634.19	2.14
RC2	平均	32.72	685.12	72.80	778.05	80.58	661.34	2.14
SRC1	正向	44.90	491.13	71.13	508.00	161.80	431.80	3.60
SRC1	负向	48.07	569.02	118.10	618.50	107.07	525.81	2.23
SRC1	平均	46.48	530.07	94.61	563.25	134.44	478.76	2.92

从表 2 中可以看出,足尺钢骨混凝土剪力墙试件 SRC1 比足尺钢筋混凝土剪力墙试件 RC1 的屈服荷载增大了 78.52%,表明混凝土中加入钢骨可以明显延缓试件钢材的屈服。同时,含有钢骨的试件,试件 SRC1 极限荷载比 RC1 正向增大 54.83%,负向增大 94.74%,平均增大 74.46%,极限荷载和破坏荷载明显较大,说明钢骨的加入提高了试件的承载能力,钢骨与混凝土在剪力墙试件中能够协同工作。对含有钢骨的足尺试件 SRC1 与不含钢骨足尺试件 RC1 对比发现, SRC1 延性系数比 RC1 延性系数增大 7.35%,表明钢骨表现出了良好的变形能力,能增强试件的延性。试件 RC2 比试件 RC1 屈服荷载正负向平均增大 130.74%,极限荷载增大 140.99%,破坏位移减小 48.19%。剪跨比较小的试件屈服荷载和极限荷载都明显较大,但是破坏位移较小,位移延性系数变小。说明剪跨比越小试件承载力越高,但试件的延性逐渐降低。

3.2 滞回特性

足尺混凝土剪力墙试件水平荷载-位移滞回曲线如图 4 所示。

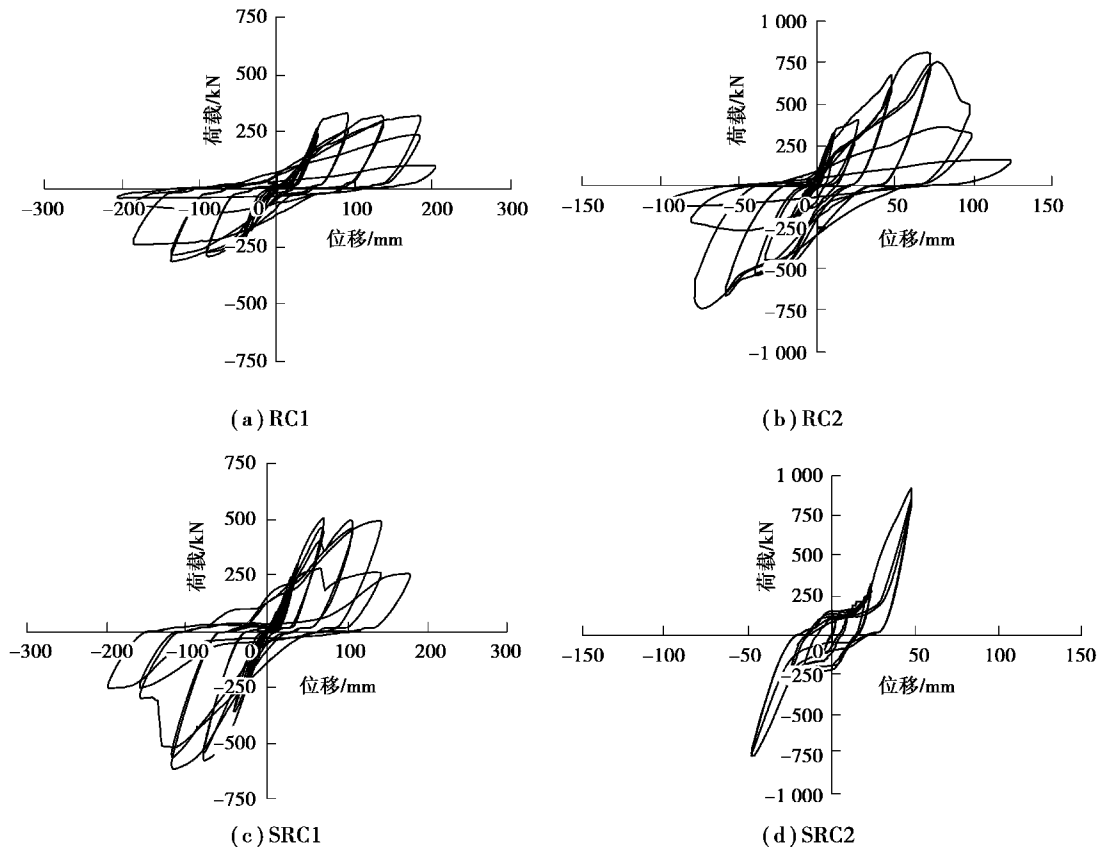


图 4 荷载-位移滞回曲线
Fig. 4 Load-displacement curves

比较足尺钢筋混凝土剪力墙试件 RC1 与 RC2 滞回曲线发现,剪跨比较小的剪力墙试件 RC2 的滞回曲线中部捏拢现象稍微严重,极限荷载较高,承载力较大,试件破坏特征较为明显,荷载下降较快。这表明:剪跨比的降低会提高剪力墙试件的极限承载力,但降低试件的变形能力。比较试件 RC1 与 SRC1 滞回曲线发现,含钢骨的足尺剪力墙试件承载力明显变大,变形能力更强,表明钢骨的加入增强了剪力墙试件的整体抗震性能;对比试件 RC1 与 SRC1 破坏前的滞回曲线,含有钢骨的试件残余变形较小,表明含有钢骨的剪力墙破坏前有良好的恢复能力。

3.3 骨架曲线

足尺混凝土剪力墙试件的骨架曲线,如图 5 所示。

由图 5 可以发现,各个试件骨架曲线正负加载方向骨架基本对称。对比各试件的骨架曲线可以看出,含有足尺钢骨的剪力墙试件 SRC1 与 SRC2 整体刚度较大,承载力较高,延性较好;不含钢骨的足尺剪力墙试件承载力相对较低,强度不高。说明钢骨的加入提高了剪力墙试件的整体承载力,钢骨与混凝土的协同工作使得试件整体刚度有了提高。剪跨比较大的足尺试件 RC1 和 SRC1 极限变形能力明显较强,延性更好,但是初始刚度较低;剪跨比小的足尺试件 RC2 强度较大,但是承载力下降较快,延性较差。这表明剪跨比的减小能提高剪力墙试件的承载力,降低试件的变形能力。

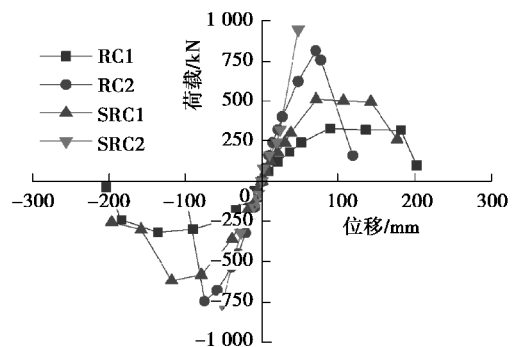


图 5 骨架曲线
Fig. 5 Skeleton curves

3.4 刚度退化

足尺混凝土剪力墙试件刚度退化曲线如图 6 所示。

对比是否含钢骨的试件可以看出:试件 SRC1 初始刚度较试件 RC1 增大 64.08%,试件 SRC2 初始刚度较试件 RC2 增大 47.54%,说明足尺钢骨剪力墙试件初始刚度较大,钢骨可以增强试件整体刚度。含有钢骨的剪力墙试件刚度退化速率稍快,最终刚度与足尺钢筋混凝土剪力墙试件 RC1 与 RC2 基本一致,说明加入钢骨提高了足尺剪力墙试件的初始刚度,但试件不断破坏过程中刚度退化较不含钢骨剪力墙明显。对比不同剪跨比的试件发现,剪跨比较小的足尺试件 RC2 和 SRC2 初始刚度分别比试件 RC1 和 SRC1 增大了 189.17%和 160.02%,但是刚度退化较快,屈服后刚度退化速度更快,最终刚度接近为零,说明剪跨比的增大可以减缓剪力墙试件的刚度退化,在剪力墙设计时应选取合适的剪跨比值。

3.5 耗能能力

足尺混凝土剪力墙试件的等效粘滞阻尼系数曲线如图 7 所示。

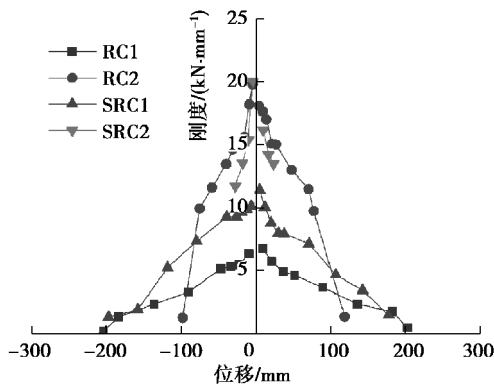


图 6 刚度退化曲线

Fig. 6 Stiffness degradation curves

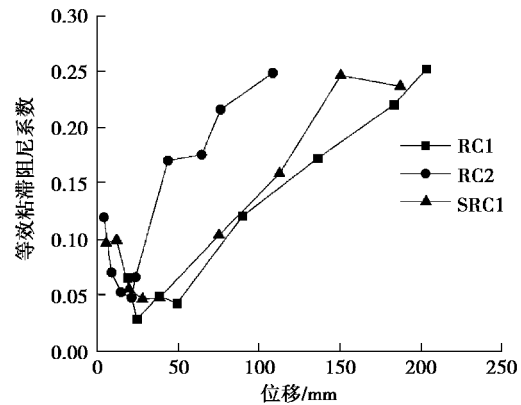


图 7 试件的等效粘滞阻尼系数-位移曲线

Fig. 7 Equivalent viscous damping coefficient-displacement curves

从图 7 中可以看出,试件的等效粘滞阻尼系数在屈服前较小,屈服以后迅速增加。含有钢骨的足尺试件 SRC1 的等效粘滞阻尼系数与不含钢骨的足尺试件 RC1 和 RC2 的变化趋势基本一致,均为屈服前先降低,屈服后逐渐增加。对比试件 SRC1 和试件 RC1 的等效粘滞阻尼系数,屈服后试件 SRC1 在相同位移下较 RC1 增大 15.27%,可以看出钢骨剪力墙试件等效粘滞阻尼系数大,耗能能力较强,这说明加入钢骨可以提高足尺剪力墙试件的耗能能力。此外,剪跨比较大的足尺钢骨剪力墙试件 SRC1 破坏前的等效粘滞阻尼系数略微下降原因为钢板焊缝拉断。试件 RC2 等效粘滞阻尼系数较试件 RC1 增大 44.15%,破坏位移较 RC1 减小 48.19%。剪跨比较小的足尺钢筋混凝土剪力墙试件 RC2 耗能能力较强,但极限位移较小,变形能力较差。

4 结 论

1) 足尺剪力墙试件加入钢骨后,减缓了裂缝的发展,减小了裂缝的宽度,试件破坏时混凝土压溃情况较轻。足尺钢骨混凝土和钢筋混凝土剪力墙试件剪跨比较大时,试件发生弯曲破坏;剪跨比较小时,试件发生剪切破坏。

2) 含有钢骨的足尺剪力墙相较于不含钢骨的足尺钢筋混凝土剪力墙,承载力较高,变形能力较强,整体刚度较大,延性较好,耗能能力明显提高。剪跨比较小的钢筋混凝土足尺剪力墙试件承载力更大、初始刚度耗能能力明显优于剪跨比较大的试件,试件延性较低,变形能力较差。

3) 钢骨混凝土剪力墙试件中,钢骨、栓钉、混凝土能很好地协同工作,提高了剪力墙试件的抗震性能。钢板焊缝在试验中出现破坏,应该考虑改善钢骨组成形式,或者改变钢骨形状等方式,进一步保证试件强度。栓钉在试验中未发生脱落或者滑移,为以后剪力墙设计提供了经验。

参考文献:

- [1] Hossain K M A, Wright H D. Performance of double skin-profiled composite shear walls: experiments and design equations[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2004, 31(2): 204-217.
- [2] Hossain K M A, Wright H D. Experimental and theoretical behaviour of composite walling under in-plane shear[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(1): 59-83.
- [3] Sigariyazd M A, Joghataie A, Attari N K A. Analysis and design recommendations for diagonally stiffened steel plate shear walls[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 103: 72-80.
- [4] Safari Gorji M, Cheng J J R. Plastic analysis and performance-based design of coupled steel plate shear walls[J]. Engineering Structures, 2018, 166: 472-484.
- [5] 王晓燕. 型钢高强混凝土短肢剪力墙抗震性能试验及理论研究[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
WANG Xiaoyan. Research on seismic behavior of steel reinforced high strength concrete short-leg shear walls[D]. Nanning: Guangxi University, 2015. (in Chinese)
- [6] 纪晓东, 贾翔夫, 钱稼茹. 钢板混凝土剪力墙抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(11): 46-55.
JI Xiaodong, JIA Xiangfu, QIAN Jiaru. Experimental study on shear behavior of steel-plate composite shear walls[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(11): 46-55. (in Chinese)
- [7] 马恺泽, 阙昂, 刘伯权. 双层钢板混凝土组合剪力墙滞回性能研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(4): 39-45.
MA Kaize, QUE Ang, LIU Boquan. Research on hysteretic behavior of dual steel concrete composite shear walls[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(4): 39-45. (in Chinese)
- [8] 黄强, 李东彬, 邵弘, 等. 轻钢轻混凝土结构多层足尺模型抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(4): 10-17.
HUANG Qiang, LI Dongbin, SHAO Hong, et al. Seismic capacity evaluation of lightweight steel and lightweight concrete structure based on quasi-static cyclic test of a multi-story full scale model[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(4): 10-17. (in Chinese)
- [9] Cui C C, Huang Q, Li D B, et al. Stress-strain relationship in axial compression for EPS concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 105: 377-383.
- [10] 任重翠, 肖从真, 徐培福. 钢筋混凝土剪力墙拉剪性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(4): 20-33, 61.
REN Chongcui, XIAO Congzhen, XU Peifu. Experimental study on tension-shear performance of reinforced concrete shear wall[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(4): 20-33, 61. (in Chinese)
- [11] 王滋军, 刘伟庆, 翟文豪, 等. 新型预制叠合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(4): 1409-1419.
WANG Zijun, LIU Weiqing, ZHAI Wenhao, et al. Experimental study on seismic behavior of new type reinforced concrete composite shear wall[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2015, 46(4): 1409-1419. (in Chinese)
- [12] Wang M, Yang W G, Shi Y J, et al. Seismic behaviors of steel plate shear wall structures with construction details and materials[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 107: 194-210.
- [13] Huang Z Y, Liew J Y R. Nonlinear finite element modelling and parametric study of curved steel - concrete - steel double skin composite panels infilled with ultra-lightweight cement composite[J]. Construction and Building Materials, 2015, 95: 922-938.
- [14] Peng Y K, Wu H, Zhuge Y. Strength and drift capacity of squat recycled concrete shear walls under cyclic loading[J]. Engineering Structures, 2015, 100: 356-368.
- [15] 刘春晖. 再生混合混凝土的受压尺寸效应及外置薄钢板再生混合墙的抗震性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
LIU Chunhui. Size effect on compressive behaviors of cubes and cylinders made of DCBs&FC and seismic behaviors of double thin skin hybrid walls filled with DCBs&FC[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese)