

文章编号:1673-2049(2018)02-0111-08

# 格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能试验

徐文平<sup>1</sup>, 徐彤<sup>2</sup>

(1. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏吴中地产集团有限公司, 江苏 苏州 215104)

**摘要:**制作了 3 根格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙试验试件, 并开展组合剪力墙的低周反复水平荷载试验, 绘制出了试件的滞回曲线及骨架曲线。结果表明: 格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙具有承载能力高、延性好和耗能能力强等优点; 新型组合剪力墙可充分发挥格栅式钢墙板和管内混凝土的材料性能, 管内混凝土处于三向受压状态, 提高了混凝土的抗压强度和延性, 外侧钢墙板承担全部拉应力, 管内混凝土承担全部压应力, 协同工作优势互补; 在 1/25 rad 位移角状态下循环加载 80 次, 新型组合剪力墙塑性铰区域的管内混凝土没有明显的损坏, 试验全过程没有任何异响, 说明新型组合剪力墙在罕遇地震时 also 具有良好的工作性能和抗震延性; 格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙可实现高轴压比、高延性和薄墙厚的抗震剪力墙设计要求。

**关键词:**双钢板混凝土组合剪力墙; 抗震性能; 低周反复水平荷载试验; 滞回曲线; 骨架曲线

**中图分类号:** TU398.2

**文献标志码:** A

## Seismic Performance Test of Grille Type Double Steel Plate Concrete Composite Shear Wall

XU Wen-ping<sup>1</sup>, XU Tong<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Wuzhong Real Estate Group Co., Ltd., Suzhou 215104, Jiangsu, China)

**Abstract:** Three grille type steel plate concrete composite shear wall test specimens were made, and the low-cyclic reversed horizontal load tests on composite shear walls were carried out, then the hysteretic curves and skeleton curves of specimens were draw out. The results show that grille type double steel plate concrete composite shear wall has high bearing capacity, good ductility and strong energy dissipation capacity, etc. The new type composite shear wall can make full use of the material properties of grille type steel plate and in-pipe concrete, and the concrete in the tube is under three pressure condition, which increases the compressive strength and ductility of the concrete. The existence of in-pipe concrete plate and the tie effect of the internal diaphragm plate steel effectively limit the out-of-plane deformation of steel plate, so the grille type steel plate concrete composite shear wall has good ability to resist buckling. When the displacement angle is 1/25 rad, cyclic loading time is 80, the new type of composite shear wall plastic hinge region still has no obvious damage and without any sound in test, which shows that the new composite shear wall also has good working performance during severe earthquake. The grille type double steel plate concrete composite shear wall can realize shear wall design requirements of seismic shear wall with high axial pressure ratio, higher ductility and thinner

收稿日期: 2017-07-17

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK2012755)

作者简介: 徐文平(1962-), 男, 江苏常州人, 副教授, 工学博士, E-mail: 425616904@qq.com。

wall.

**Key words:** double steel plate concrete composite shear wall; seismic performance; low-cyclic reversed horizontal load test; hysteresis curve; skeleton curve

0 引言

超高层建筑作为现代建筑技术的结晶,提升城市和国家形象,高大建筑一直是人们展示发展成就的重要手段。随着楼层增加,超高层建筑的水平荷载成为设计控制关键因素<sup>[1-2]</sup>。为了保证高层钢结构建筑的抗震安全,超高层建筑结构亟需一种抗震性能优良的新型组合钢板剪力墙结构<sup>[3-6]</sup>。

目前,超高层建筑结构常常采用钢管混凝土框架柱-混凝土剪力墙核心筒结构体系,随着建筑结构的高度越来越高,为了保证钢筋混凝土核心筒剪力墙的延性,需要严格控制混凝土核心筒剪力墙的轴压比,混凝土核心筒剪力墙的墙厚就会设计成很厚很大,过厚的剪力墙不仅施工困难,浪费空间,而且导致自重增加,地震荷载作用力增大<sup>[7-9]</sup>。

现有的组合钢板剪力墙是在钢板两侧面现浇钢筋混凝土板的剪力墙,具有结构刚度大、屈曲荷载高、防火性能好等优点<sup>[10-13]</sup>,但存在钢筋混凝土墙板和钢板被各个击破的问题,外侧钢筋混凝土墙板先期破损,混凝土剥离损坏后与钢板分离,导致组合钢板剪力墙的后期表现接近非加劲钢板剪力墙<sup>[14-17]</sup>。钢筋混凝土板墙对于内嵌钢板的保护是暂时的,此类组合钢板剪力墙的抗震延性较差,结构耗能存在不足<sup>[18-20]</sup>。

现代超高层建筑对剪力墙结构提出了“高轴压比、高延性、薄墙厚”的要求<sup>[21-24]</sup>,本文借鉴钢管混凝土组合结构的优点,提出格栅式双钢板混凝土组合剪力墙的新理念,即扁平钢箱梁竖向放置构成长条形格栅钢管墙板,长条格栅钢管墙板的空腔内浇筑自密实高强度混凝土,形成格栅式双钢板混凝土组合剪力墙。

本文通过对此新型组合剪力墙进行低周反复拟静力试验,拟从滞回曲线、骨架曲线、延性、耗能能力等方面研究其抗震性能。

1 试件设计

本文试验设计了 3 片尺寸相同的格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙试件,截面如图 1 所示,编号为 CSW-1,CSW-2,CSW-3,其宽度为 1 400 mm,厚度为 160 mm,净高为 2 800 mm。

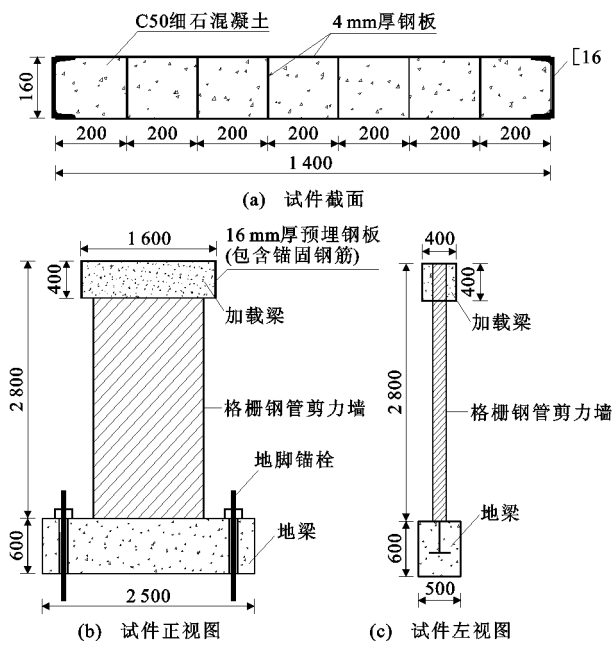


图 1 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Specimen Sizes (Unit:mm)

3 个试件分成 2 组,第 1 组 CSW-1,CSW-2 采用荷载-位移控制加载,进行轴压比对比试验,第 2 组 CSW-3 采用位移控制加载,作为验证试验试件,同时对最后一级荷载进行等幅对称位移循环加载,进一步探究塑性铰的能量累积疲劳损伤情况,具体情况如表 1 所示。

表 1 试件加载情况

Tab. 1 Load Conditions of Specimens

试件编号	轴压比	加载模式
CSW-1	0.1	荷载-位移控制
CSW-2	0.6	荷载-位移控制
CSW-3	0.1	等幅加载

3 个新型格栅管式双钢板混凝土剪力墙试件的混凝土强度等级均为 C50,内钢板和外钢板均采用 4 mm 厚 Q235B 钢材,剪力墙两端设置型号为[16]的热轧普通槽钢,钢材之间所有连接均为焊接。加载梁截面尺寸为 400 mm×400 mm,地梁截面尺寸为 500 mm×600 mm,为保证剪力墙底部与地梁间连接牢靠,在地梁顶部通长埋置中翼缘热轧 H 型钢 HM350×200。

本试验在东南大学九龙湖土木交通实验室进行,试验装置如图 2 所示。本次试验加载方式采用在轴向施加常轴力的同时在柱顶部施加反复水平荷



图 2 试验装置

Fig. 2 Test Apparatus

载。竖向轴力由液压千斤顶施加,顶部的水平反复荷载由美国 MTS 公司生产的液压伺服作动器施加,作动器的最大静态加载值为 1 500 kN,最大动态加载值为 1 000 kN,最大行程为 500 mm。

水平荷载采取荷载-位移( $P-\Delta$ )混合控制方案(图 3)。试件屈服前采用荷载控制,各级荷载增量为  $\pm 50$  kN,荷载下每级循环 1 次。屈服后采用位移控制加载,以屈服位移  $\Delta_y$  的整数倍作为位移增量加载,每级循环 3 次,直至试件水平荷载明显下降,达到峰值荷载的 75%或者试件不能稳定地承受竖向荷载时,加载结束。由试件边缘区最外侧的型钢实测应变值与作动器的荷载-位移信号绘制的滞回曲线图形变化趋势初步确定屈服位移  $\Delta_y$ 。

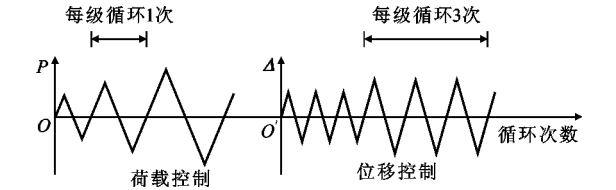


图 3 荷载-位移控制方案

Fig. 3 Load-displacement Control Scheme

试验的测量内容主要有:①水平荷载,由 MTS 伺服加载系统自动测读;②位移测量,试件的顶点位移直接采用 MTS 伺服加载系统自动测读,为了提高测量精度,增加 8 个位移计,进行人工辅助测量,位移计布置见图 4;③应变测量,组合剪力墙试件的端部槽钢设置上下 2 组应变片,侧面钢板上的四角与中间共布置 5 个三向应变花,见图 5。

## 2 试验现象及结果分析

### 2.1 试验现象

图 6 为试验现象。试件 CSW-1 施加的竖向轴

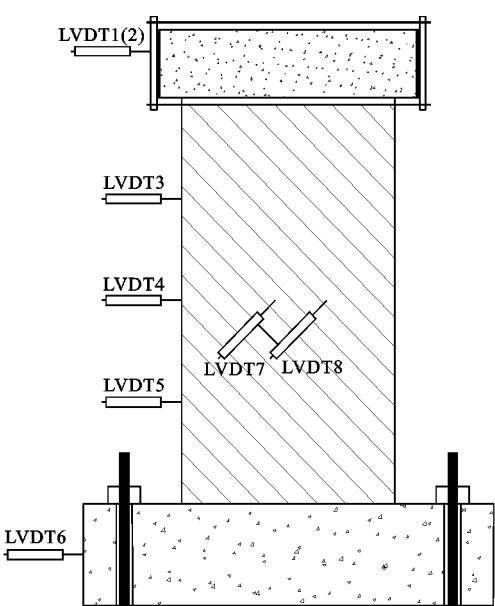


图 4 位移计布置

Fig. 4 Arrangement of Displacement Meters

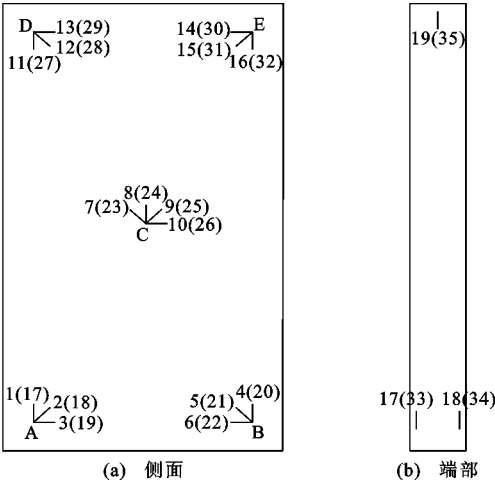
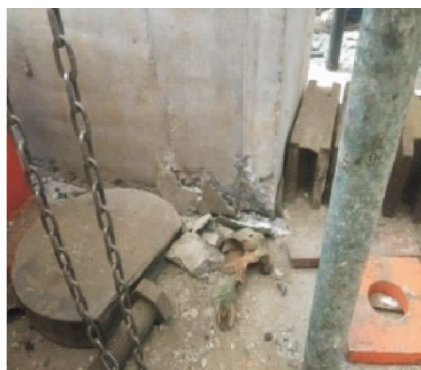


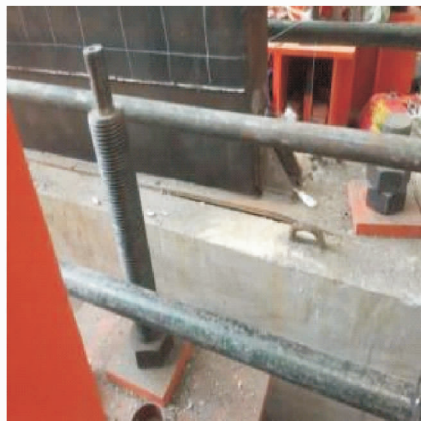
图 5 应变片布置

Fig. 5 Arrangement of Strain Gauges

压力为 400 kN,轴压比设计值为 0.1,加载采用荷载-位移控制。加载初期试件无异常现象,试件具有较大的初始刚度。弹性加载阶段结束时试件的水平位移在 12 mm 左右(层间侧移角为 1/200 rad 左右),端部槽钢应力达到屈服应力,基本无面外变形。试件整体屈服后采用位移控制加载,位移加载至  $\pm 84$  mm(层间侧移角为 1/40 rad 左右)时,试件距离根部 9 cm 处两侧钢板出现略微鼓起,地梁预埋的 H 型钢表面出现略微翘曲变形现象。当位移加载至  $\pm 114$  mm(层间侧移角为 1/25 rad 左右)时,试件根部两侧钢板有明显鼓起,地梁端部混凝土挤压破碎,预埋的 H 型钢梁出现严重翘曲变形,试验终止。整个试验过程中试件墙体钢板无明显屈曲现象,全程无



(a) 地梁端部混凝土压碎



(b) 预埋H型钢梁翘曲变形



(c) 内部混凝土状况良好

图 6 试验现象

Fig. 6 Test Phenomena

异响。本试验地梁预埋 H 型钢上下翼缘间仅设置了拉结钢筋,未设置加劲钢板,由于试验吨位较大等原因,反复荷载作用下试验后期 H 型钢翼缘出现严重翘曲变形,终止试验,此时组合剪力墙试件仍然具有一定的残余承载能力。

试件 CSW-2 施加的竖向轴压力为 2 400 kN,轴压比设计值为 0.6,加载采用荷载-位移控制。加载初期试件无异常现象,弹性加载阶段结束时试件的水平位移在 11 mm 左右(层间侧移角为  $1/225$

rad 左右),端部槽钢应力达到屈服应力,试件整体屈服后采用位移控制加载。当位移加载至  $\pm 33$  mm(层间侧移角为  $1/85$  左右)时,试件距离根部 8 cm 处钢板出现略微鼓起,地梁端部表面混凝土有少量起皮现象。当位移加载至  $\pm 55$  mm(层间侧移角为  $1/50$  rad 左右)时,试件根部两侧钢板有明显鼓起,地梁端部混凝土受挤压破碎严重,预埋的锚固 H 型钢梁局部拔起,试验终止。整个试验过程中试件墙体钢板无明显屈曲现象,全程无异响。与 CSW-1 相比,CSW-2 屈服位移和峰值位移有所下降,屈服荷载和峰值荷载有较大的提高。

试件 CSW-3 施加的竖向轴压力为 400 kN,轴压比设计值为 0.1,加载采用位移控制。当位移加载至  $\pm 108$  mm(层间侧移为  $1/25$  rad 左右)时,对此级荷载进行等幅对称循环加载,当循环第 20 次后,试件根部钢板局部鼓胀有所发展,地梁端部混凝土破坏加剧,受挤压破碎并开始剥落;滞回曲线不断重叠,反映试件刚度维持稳定,当循环第 80 次后,侧向钢板局部屈曲明显,地梁预埋的 H 型钢梁翼缘翘曲变形严重,混凝土地梁破损严重,试验结束,此时组合剪力墙试件仍然具有一定的残余承载能力。整个试验过程中试件墙体钢板无明显屈曲现象,全程无异响。试验结束时为了观察内部混凝土受力情况,在试件正面接近底部的位置,割开外层钢板,对混凝土取芯,发现内部混凝土基本完好,未出现肉眼可见的裂缝。

格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙是由多个钢管混凝土柱组合形成,管内混凝土处于三向受压状态,提高了管内混凝土的抗压强度和延性,有效避免了管内混凝土过早破坏。新型格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙可充分发挥钢板和管内混凝土的材料性能,协同工作,优势互补,具有良好的抗震能力和耗能能力。格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙内部设置拉结横隔钢板,可有效地限制外侧抗剪钢板的平面外屈曲变形,管内混凝土承担全部压应力,避免了抗剪钢板受压,因此格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙具有较高的抗平面外屈曲能力。格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙的混凝土放置在格栅钢管内,三向受压,可大幅度提高混凝土的抗压强度和延性,外侧钢板承担全部拉应力,避免了管内混凝土受拉破损,因此格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙具有良好的延性性能。

## 2.2 滞回曲线

取水平荷载和试件顶端与底端的相对位移,绘

制试件的滞回曲线,见图 7。在位移加载初期,试件处于弹性阶段,试件的承载力与水平位移近似呈线性关系,并且具有较高的初始刚度,随着加载位移的增加,试件  $P-\Delta$  曲线出现拐点,试件进入弹塑性阶段,并随着层间位移增加,滞回环包围的面积不断增大,形状饱满,承载力不断提高,切线刚度开始逐渐减小。从组合剪力墙试件整体滞回曲线(图 7)可以看出,组合剪力墙试件的滞回曲线比较饱满、稳定,具有良好的耗能能力,进入弹塑性阶段后,每级位移下 3 次循环的滞回曲线比较接近,表明试件在同级位移下的承载能力比较稳定。将试件 CSW-1 与 CSW-2 进行对比发现,随着试件轴压比增大,其承载力提高,耗能能力、延性性能变差。将试件 CSW-1 与 CSW-3 进行对比发现,试件在 2 种不同加载模式下,其受力性能并没有太大区别,但在屈服前和屈服后有略微差异。

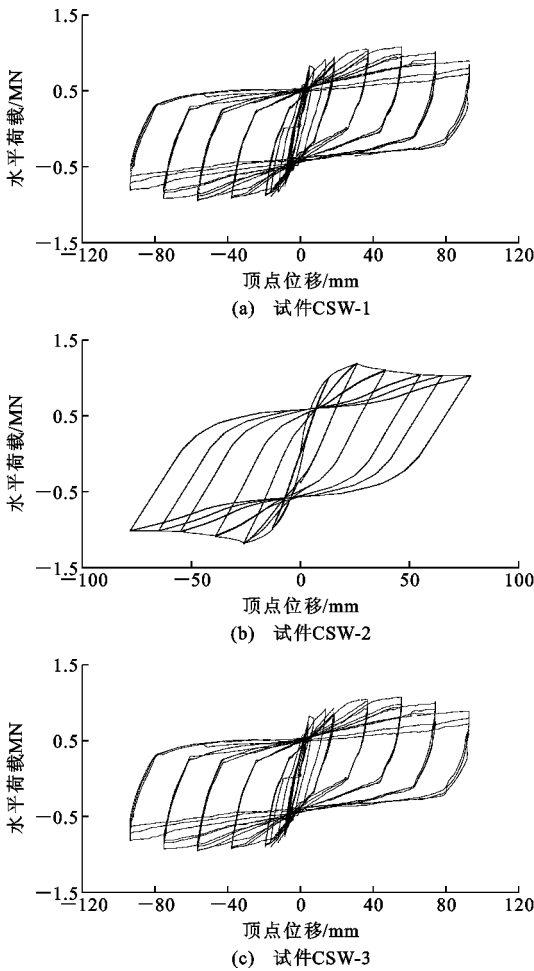


图 7 试件滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis Curves of Specimens

2.3 骨架曲线

组合剪力墙试件的骨架曲线如图 8 所示。从图

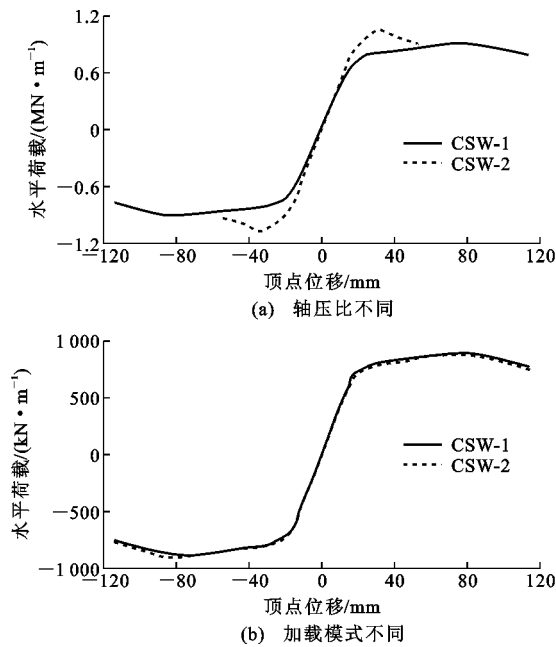


图 8 试件骨架曲线

Fig. 8 Skeleton Curves of Specimens

8 可以看出,试件从加载开始到破坏经历了上升段和下降段 2 个部分。当施加的荷载较小时,混凝土未开裂,钢板未屈服,试件处于弹性阶段,此时试件的刚度基本保持不变,骨架曲线近似呈直线;随着荷载增大,试件刚度开始缓慢降低,且累积了不同程度的残余变形;荷载继续增大后,钢板屈服,此时骨架曲线上出现了一个明显的拐点,斜率进一步降低,刚度快速下降,试件很快达到峰值荷载,以上皆为曲线的上升段部分。当超过峰值荷载之后,曲线进入下降段。从图 8 骨架曲线还可以看出,试件达到峰值荷载后,曲线下降比较平缓,即承载力下降比较缓慢,可见钢板对内部混凝土起到了较好的约束作用,属于延性破坏。

2.4 延性分析

结构或构件的延性大小通常用延性系数来衡量,本文采用简化的延性系数,即达到试件破坏极限所对应的位移延性系数。3 个试件的骨架曲线特征值如表 2 所示,其中确定屈服点采用割线刚度法;极限位移取承载力下降为峰值荷载的 85% 时所对应的位移。由表 2 可看出,格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙在低轴压比时具有良好的延性,延性系数接近 9,在高轴压比下,其延性系数接近 5,主要原因是新型格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙内部为自密实高强度混凝土,大大提高了组合剪力墙结构的轴压受力性能,加强了此新型组合剪力墙结构的强度和刚度。



表 2 骨架曲线特征值

Tab. 2 Characteristic Values of Skeleton Curves

试件 编号	屈服荷 载/kN	屈服位 移/mm	峰值荷 载/kN	峰值位 移/mm	极限位 移/mm	延性 系数
CSW-1	702.36	12.62	929.84	69.08	114	9.03
CSW-2	811.11	10.78	1 082.38	30.90	55	5.10
CSW-3	682.72	12.32	925.17	68.25	114	9.25

2.5 刚度退化

在试件进入塑性阶段后,随着加载次数的增多和位移幅值的不断增大,塑性损伤逐渐累积,墙体刚度表现出明显的退化过程。

试件刚度退化曲线基本关于坐标轴对称(图 9),试件刚度在整个受荷过程中退化比较明显;试件刚度在试件屈服前后退化较快,之后刚度退化曲线趋于平缓;轴压比较大时,其初始刚度较大,且刚度退化得更快;加载模式对刚度的影响不大,两者无太大区别。试件从屈服、达到峰值荷载直到最终破坏,其刚度均在逐渐降低。加载初期刚度下降较快,加载后期试件初步表现出较好的耗能能力,刚度随位移增大而缓慢衰减。

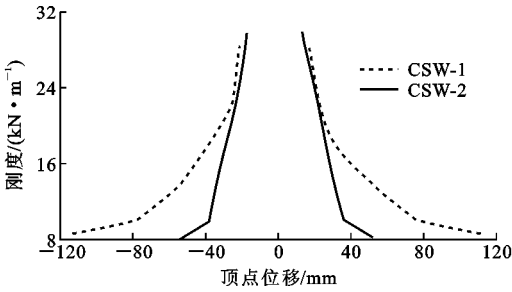


图 9 试件刚度退化曲线

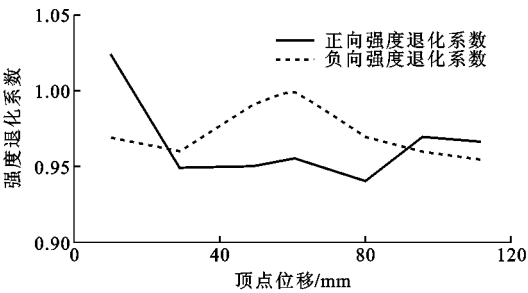
Fig. 9 Stiffness Degeneration Curves of Specimens

2.6 强度退化

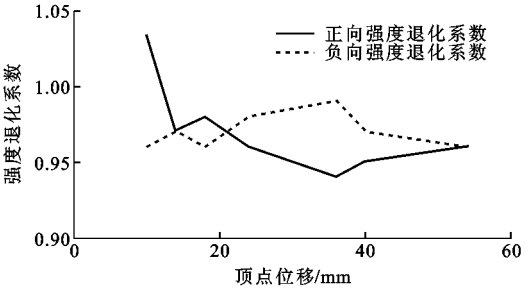
在位移幅值不变的条件下,结构或构件承载力随荷载反复循环次数的增加而降低的现象叫强度退化。图 10 为试件强度退化系数曲线。从图 10 可以看出,试件的承载力均较为稳定,尽管结构强度在整个受荷过程中发生了不同程度的退化,但其退化系数均大于 0.9,说明该结构的强度即结构承载力具有良好的稳定性,不会发生突然的强度破坏,大震作用下仍能在较长的一段时间内保持较高的承载力。

2.7 耗能能力

结构或构件的耗能能力是指结构或构件在地震动作用下通过自身塑性变形耗散外部输入能量的能力,它是衡量结构或构件抗震性能的一个重要指标,反映了其非线性力学性能。图 11 为试件的能量耗散系数-位移曲线。以试件 CSW-1 为例,分阶段来



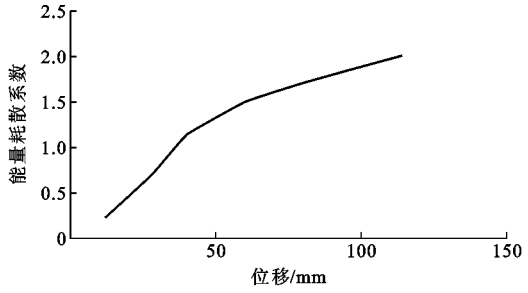
(a) 试件CSW-1



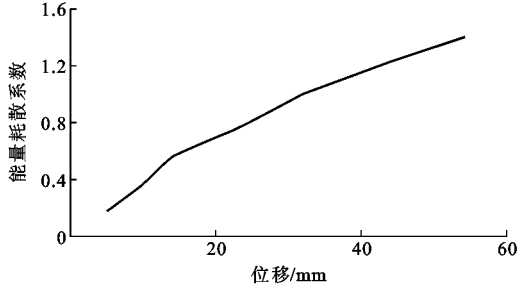
(b) 试件CSW-2

图 10 试件强度退化系数曲线

Fig. 10 Strength Degradation Coefficient Curves of Specimens



(a) 试件CSW-1



(b) 试件CSW-2

图 11 试件能量耗散系数-位移曲线

Fig. 11 Energy Dissipation Coefficient-displacement Curves of Specimens

看,受荷初期试件处于弹性阶段,滞回环所包围的面积较小,此阶段试件基本不具备耗能能力;随着外荷载的增大,试件的滞回环所包围的面积显著提高,说明当试件处于屈服阶段时,试件已初步具有耗能能力,此后,随着位移的不断增大,试件的滞回环面积仍呈线性增长。对比试件 CSW-1 与试件 CSW-2,

发现轴压比增大时,试件的滞回环面积减小,能量耗散系数降低,耗能能力减弱。综上,此新型格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙结构的承载力较为稳定,滞回性能良好,具有较高的耗能能力,可以有效防止大震作用下的结构倒塌。

### 3 结 语

(1)格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙抗震性能优良,在低周反复荷载作用下的滞回曲线较为饱满,具有承载力高、延性大和耗能能力强等优点,可实现高轴压比、高延性和薄墙厚的抗震剪力墙设计要求。

(2)格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙管内混凝土处于三向受压状态,提高了管内混凝土的抗压强度和延性;设置间距较密的拉结横隔钢板有效地限制了外侧抗剪钢板的平面外变形,管内混凝土承担全部压力避免了抗剪钢板受压,外侧钢板具有较高的抗平面外屈曲能力。

(3)格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙是由多个钢管混凝土柱组合形成,管内混凝土处于三向受压状态,提高了管内混凝土的抗压强度和延性,有效避免了其过早破坏,使得新型格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙可充分发挥钢板和混凝土的抗震能力和耗能能力。

(4)格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙具有较好的承载能力和稳定性,在 $1/25$  rad 位移角下,循环加载 80 次,新型钢板剪力墙塑性铰区域仍然没有明显的损坏,试验全过程中无任何异响。

(5)随着轴压比的增加,格栅管式双钢板混凝土组合剪力墙的承载能力增大,墙体的延性和耗能能力逐渐降低。

### 参考文献:

#### References:

[1] 赵 昕,丁洁民,孙华华,等.上海中心大厦结构抗风设计[J].建筑结构学报,2011,32(7):1-7.  
ZHAO Xin, DING Jie-min, SUN Hua-hua, et al. Structural Design of the Shanghai Tower for Wind Loads [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(7):1-7.

[2] 汪大绥,周建龙,袁兴方.上海环球金融中心结构设计[J].建筑结构,2007,37(5):8-12.  
WANG Da-sui, ZHOU Jian-long, YUAN Xing-fang. Structural Design of Shanghai World Financial Center [J]. Building Structure, 2007, 37(5):8-12.

[3] HOSSAIN K M A, WRIGHT H D. Experimental and Theoretical Behavior of Composite Walling Under In-plane Shear[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(1):59-83.

[4] EOM T S, PARK H G, LEE C H, et al. Behavior of Double Skin Composite Wall Subjected to In-plane Cyclic Loading[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(10):1239-1249.

[5] 丁洁民,吴宏磊,赵 昕.我国高度 250 m 以上超高层建筑结构现状与分析进展[J].建筑结构学报,2014, 35(3):1-7.  
DING Jie-min, WU Hong-lei, ZHAO Xin. Current Situation and Discussion of Structural Design for Super High-rise Buildings Above 250 m in China[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(3):1-7.

[6] JGJ 101—96,建筑抗震试验方法规程[S].  
JGJ 101—96, Specification of Testing Methods for Earthquake Resistant Building[S].

[7] 任凤鸣.钢管混凝土框架-核心筒减震结构的抗震性能研究[D].广州:广州大学,2012.  
REN Feng-ming. Disaster Prevention and Reduction Engineering and Protective Engineering [D]. Guangzhou:Guangzhou University, 2012.

[8] ASTANEHASL A. Seismic Behavior and Design of Composite Steel Plate Shear Walls [R]. Moraga: Structural Steel Educational Council, 2002.

[9] LINK R A, ELWI A E. Composite Concrete-steel Plate Walls: Analysis and Behavior [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(2):260-271.

[10] 聂建国,樊健生,黄 远,等.钢板剪力墙的试验研究[J].建筑结构学报,2010,31(9):1-8.  
NIE Jian-guo, FAN Jian-sheng, HUANG Yuan, et al. Experimental Research on Steel Plate Shear Wall[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(9):1-8.

[11] 郭彦林,董全利,周 明.防屈曲钢板剪力墙滞回性能理论与试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(1):31-39,47.  
GUO Yan-lin, DONG Quan-li, ZHOU Ming. Tests and Analysis on Hysteretic Behavior of Buckling Restrained Steel Plate Shear Wall[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(1):31-39, 47.

[12] DRIVER R G, KULAK G L, KENNEDY D J L, et al. Cyclic Test of Four-story Steel Plate Shear Wall [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(2):112-120.

[13] 钟善桐.钢管混凝土结构[M].3版.北京:清华大学出版社,2003.  
ZHONG Shan-tong. Structures of Concrete Filled

- Steel Tube[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [14] ELGAALY M, LIU Y B. Analysis of Thin-steel-plate Shear Walls[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(11): 1487-1496.
- [15] 曹万林, 王尧鸿, 董宏英, 等. 钢管混凝土边框内藏钢板剪力墙振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(2): 75-81.
- CAO Wan-lin, WANG Yao-hong, DONG Hong-ying, et al. Shaking Table Test Study on Shear Walls with Concrete-filled Steel Tube Columns and Embedded Steel-plate[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2011, 31(2): 75-81.
- [16] 聂建国, 朱力, 樊健生, 等. 钢板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(1): 61-69.
- NIE Jian-guo, ZHU Li, FAN Jian-sheng, et al. Experimental Research on Seismic Behavior of Steel Plate Shear Walls[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 61-69.
- [17] HU H T, HUANG C S, CHEN Z L. Finite Element Analysis of CFST Columns Subjected to an Axial Compressive Force and Bending Moment in Combination[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61: 1692-1712.
- [18] 郭彦林, 周明, 董全利, 等. 三类钢板剪力墙结构试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 17-29.
- GUO Yan-lin, ZHOU Ming, DONG Quan-li, et al. Experimental Study on Three Types of Steel Plate Shear Walls Under Cyclic Loading[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(1): 17-29.
- [19] 吕西林, 干涇洁, 王威. 内置钢板钢筋混凝土剪力墙抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 89-96.
- LU Xi-lin, GAN Chun-jie, WANG Wei. Study on Seismic Behavior of Steel Plate Reinforced Concrete Shear Walls[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 89-96.
- [20] 朱伯龙. 结构抗震试验[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- ZHU Bo-long. Earthquake-resistance Test of Structures[M]. Beijing: Seismological Press, 1989.
- [21] 聂建国, 陶慕轩, 樊健生, 等. 双钢板-混凝土组合剪力墙研究新进展[J]. 建筑结构, 2011, 41(12): 52-60.
- NIE Jian-guo, TAO Mu-xuan, FAN Jian-sheng, et al. Research Advances of Composite Shear Walls with Double Steel Plates and Filled Concrete[J]. Building Structure, 2011, 41(12): 52-60.
- [22] MCKINLEY B, BOSWELL L F. Behaviour of Double Skin Composite Construction[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(10): 1347-1359.
- [23] 卜凡民, 聂建国, 樊健生. 高轴压比下中高剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 91-98.
- BU Fan-min, NIE Jian-guo, FAN Jian-sheng. Experimental Study on Seismic Behavior of Medium and High Shear-span Ratio Composite Shear Wall with Double Steel Plates and Infill Concrete Under High Axial Compression Ratio[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(4): 91-98.
- [24] 曹万林, 于传鹏, 董宏英, 等. 不同构造双钢板组合剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增1): 186-191.
- CAO Wan-lin, YU Chuan-peng, DONG Hong-ying, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Composite Shear Walls with Double Steel Plates Under Different Constructions[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(S1): 186-191.