

文章编号: 1000-4750(2013)06-0060-07

# 高轴压比、低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙 拟静力试验研究

聂建国<sup>1</sup>, 卜凡民<sup>1,2</sup>, 樊健生<sup>1</sup>

(1. 清华大学土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084; 2. 中国建筑科学研究院, 北京 100013)

**摘 要:** 双钢板-混凝土组合剪力墙可减小墙体厚度、提高承载力和延性, 为研究双钢板-混凝土组合剪力墙高轴压比下的抗震性能, 完成了5个剪跨比为1.0的双钢板-混凝土组合剪力墙试件的拟静力试验, 研究了剪力墙在低周往复荷载作用下的受力性能和破坏模式等, 分析了轴压比、距厚比等因素对抗震性能的影响。试验结果表明: 低剪跨比试件发生弯剪破坏; 墙体钢板在平均位移角1/83时发生局部屈曲, 初始屈曲形态受距厚比影响显著; 试件峰值荷载、位移延性系数、刚度等受轴压比、距厚比的影响较小; 试件平均极限位移角达1/72、平均有效破坏位移角达1/52, 具有良好的变形能力; 距厚比增大, 试件滞回性能稳定性降低; 试件耗能随变形增大而迅速增长, 抗震性能良好。建议低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙轴压比限值取0.7。

**关键词:** 双钢板-混凝土组合剪力墙; 高轴压比; 低剪跨比; 拟静力试验; 抗震性能

**中图分类号:** TU398.2; TU317.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.09.0587

## QUASI-STATIC TEST ON LOW SHEAR-SPAN RATIO COMPOSITE SHEAR WALL WITH DOUBLE STEEL PLATES AND INFILL CONCRETE UNDER HIGH AXIAL COMPRESSION RATIO

NIE Jian-guo<sup>1</sup>, BU Fan-min<sup>1,2</sup>, FAN Jian-sheng<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The composite shear wall with double steel plates and infill concrete has advantages of reducing wall thickness and increasing capacity and ductility. In order to study the seismic performance of a composite shear wall with double steel plates and infill concrete under a high axial compression ratio, quasi-static tests on five composite shear walls with double steel plates and infill concrete of the shear span ratio of 1 were conducted. The seismic performance and failure modes were observed under low cyclic lateral loads, and the axial compression ratio and distance to thickness ratio on the seismic performance were analyzed. The results indicate that the failure mode of specimens is the flexural-shear failure. Local buckling occurs when the average displacement angle reaches 1/83, and the form of initial buckling is significantly affected by the distance to thickness ratio of steel plate. The specimen peak load, displacement ductility factor and stiffness are less influenced by axial compression ratio and distance to thickness ratio. The average ultimate displacement angle of the specimens reaches 1/72, and the average effective failure displacement angle is up to 1/52, showing good deformability. The stability of hysteretic behavior of the specimens reduces with the distance to thickness ratio increased. Energy dissipation capacity increases rapidly with the increase of deformation, showing a good seismic performance. The axial compression ratio of a low shear-span ratio composite shear wall with double steel plates and infill concrete is

收稿日期: 2011-09-06; 修改日期: 2011-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178246); 清华大学自主科研计划项目(20101081766)

通讯作者: 聂建国(1958—), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士, 博导, 从事组合结构研究(E-mail: niejg@mail.tsinghua.edu.cn).

作者简介: 卜凡民(1983—), 男, 山东日照人, 工程师, 博士, 从事组合结构研究(E-mail: bfm02@163.com);

樊健生(1975—), 男, 山东烟台人, 副教授, 博士, 从事组合结构研究(E-mail: fanjsh@mail.tsinghua.edu.cn).

recommended to take 0.7.

**Key words:** composite shear wall with double steel plates and infill concrete; high axial compression ratio; low shear-span ratio; quasi-static test; seismic performance

剪力墙或由剪力墙组成的筒体是高层建筑的主要抗侧力构件。随着建筑高度增加和建筑功能需求的提高,对剪力墙性能的要求随之提高。巨大的竖向荷载需采用较厚剪力墙才能满足现行规范关于剪力墙轴压比的限值,过厚的墙体减小建筑使用空间、增大结构自重、增加基础造价,而且相应地引起外框架柱尺寸增大。为了解决这些工程问题,一些学者提出了新型的组合剪力墙,并有部分已应用于实际工程,如内置钢板混凝土组合剪力墙<sup>[1-3]</sup>、配置钢暗支撑组合剪力墙<sup>[4]</sup>、钢筋混凝土组合剪力墙<sup>[5]</sup>等。

普通低剪跨比钢筋混凝土剪力墙在水平地震作用下多发生脆性剪切破坏,延性较差,而混凝土墙体与外置钢板组合形成双钢板-混凝土组合剪力墙,能充分发挥两种材料的优势:混凝土能增强钢板的稳定性,钢板则对混凝土有一定的约束作用,有利于采用高标号混凝土,同时提高剪力墙受剪承载力和变形能力,增强结构整体抗震性能。此外双层钢板避免了混凝土裂缝的暴露,提高了使用性能和耐久性,在设计承载力一定时,可以减小剪力墙厚度,减轻结构自重,增加建筑使用空间;同时钢板可作为混凝土浇筑的模板,方便施工。国外学者<sup>[6-7]</sup>对双层钢板之间设置密集的竖向或者横向加劲肋、中间内填混凝土的组合剪力墙进行了试验研究,试验结果表明该类剪力墙具有良好的抗震性能,但是由于构造复杂、加工困难、造价偏高,目前仅用于核电站、海洋平台等恶劣环境下的结构。

本文完成了 5 个双钢板-混凝土组合剪力墙拟静力试验,研究高轴压比、低剪跨比组合剪力墙的抗震性能,组合剪力墙的钢板与混凝土之间采用栓钉连接件,构造简单、施工方便,分析了栓钉间距与钢板厚度之比对试件受力性能的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验设计了 5 个双钢板-混凝土组合剪力墙试件,编号为 CSW-5~CSW-9。水平荷载加载点到基础梁顶面的距离均为 800mm,剪跨比 $\lambda=1.0$ 。墙体截面高度 800mm,厚度 90mm,钢板厚 3mm。试件

两端设置矩形钢管混凝土端柱,设计时综合考虑试验设备加载能力和端柱尺寸对墙体受力性能的影响,采用较小的端柱截面,尺寸为 100mm×120mm,并在端柱内设置 1 根 HRB335 级钢筋,直径 22mm,墙体水平及竖向分布钢筋均为双层 $\Phi 6@200$ mm。栓钉尺寸为 $\Phi 6$ mm×40mm。在试件底部和顶部分别设置钢筋混凝土基础梁和加载梁,组合剪力墙钢结构部分的两端伸入基础梁和加载梁中,并加强钢结构与混凝土界面的抗剪连接构造,以保证锚固强度。试件尺寸和构造如图 1 所示,主要设计参数见表 1。

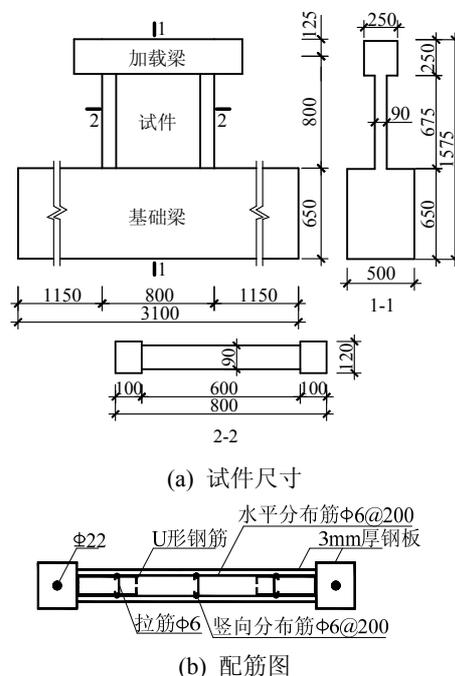


图 1 组合剪力墙试件尺寸及构造

Fig.1 Dimension and detailing of composite shear wall

各试件采用三种轴压比试验值: 0.24、0.30、0.42,轴压比 $n=N_t/(f_c A)$ ,式中 $N_t$ 为轴压力试验值, $f_c$ 为混凝土轴心抗压强度实测平均值, $A$ 为剪力墙总截面面积。取混凝土材料分项系数 1.4、轴压力分项系数 1.2,将轴压比试验值换算为轴压比设计值分别为: 0.4、0.5、0.7。

### 1.2 材性试验

CSW-5~CSW-9 混凝土立方体抗压强度 $f_{cu}$ 实测值分别为: 27.5MPa、25.4MPa、30.1MPa、28.2MPa 和 26.4MPa。钢板、钢筋屈服强度 $f_y$ 、极限强度 $f_u$ 实测平均值见表 2。

表 1 试件参数  
Table 1 Parameters of specimens

试件编号	墙高/mm	剪跨比	端柱		墙体		轴压比试验值	栓钉间距/mm	距厚比	连接件
			矩形钢管截面尺寸/mm	钢筋配置	钢板/mm	分布钢筋				
CSW-5	800	1.0	120×100×3	1φ22	3	φ6@200	0.30	150	50	栓钉
CSW-6	800	1.0	120×100×3	1φ22	3	φ6@200	0.30	100	33	栓钉
CSW-7	800	1.0	120×100×3	1φ22	3	φ6@200	0.24	75	25	栓钉
CSW-8	800	1.0	120×100×3	1φ22	3	φ6@200	0.30	75	25	栓钉
CSW-9	800	1.0	120×100×3	1φ22	3	φ6@200	0.42	75	25	栓钉

注：距厚比  $r$  表示栓钉间距与钢板厚度的比值。

表 2 钢筋及钢板材性试验结果

Table 2 Material properties of reinforced bars and steel plates

钢筋或钢板尺寸/mm	屈服强度 $f_y$ /MPa	极限强度 $f_u$ /MPa	强屈比
6	364	488	1.34
22	444	615	1.39
3(厚)	306	435	1.42

1.3 试验装置及加载制度

试验加载装置如图 2 所示。基础梁通过锚梁、地锚螺栓锚、限位钢梁、抗剪钢块锚固于试验台座。加载梁通过丝杠、端板与水平千斤顶端面相连。试件顶部放置刚性分配梁，将千斤顶轴压力均匀传到端柱和中间墙体。竖向千斤顶与横梁之间设置滑动支座，以保证竖向千斤顶可随着试件顶部侧移而移动。控制水平千斤顶加载端面形心距基础梁顶面的距离为 800mm，保证墙体剪跨比为 1。

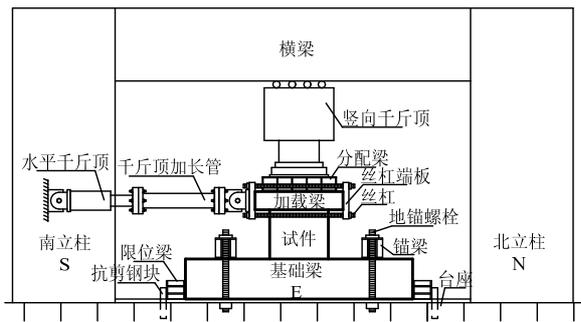


图 2 试验加载装置

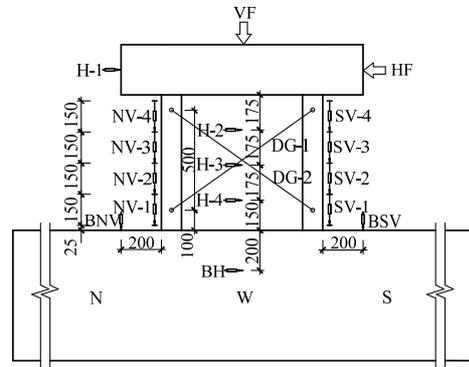
Fig.2 Test set-up

竖向千斤顶施加轴压之后，保持恒定。水平荷载加载采用力-位移双控制法：试件在弹性阶段按照力控制分成三级加载，每级荷载循环 1 次，级差 80kN；当试件荷载-位移曲线出现明显转折时即认为结构屈服，屈服后采用位移控制逐级加载，每级位移增量取试件屈服时的顶点位移  $\Delta_y$ ，每级位移循环 2 次；当顶点位移率超过 1/100 时，增大每级位移增量为  $2\Delta_y$ 。加载至试件承载力下降到峰值水平荷载的 75% 以下时，试验停止。

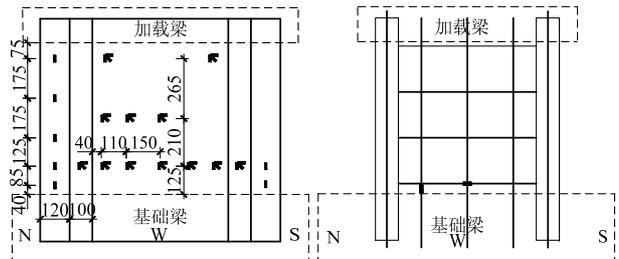
1.4 测点布置

各试件测点布置如图 3 所示。加载梁中心设置

位移计 H-1；沿墙体中心竖向设置位移计 H-2~H-4；在基础梁上布置 1 个水平位移计 BH 和 2 个竖向位移计 BNV、BSV，用以修正基础梁平动、转动对试件位移值的影响；在试件墙面设置交叉导杆引伸仪 DG-1、DG-2，用以测量墙体剪切变形。此外，在试件中布置多个应变片、应变花，如图 3(b)、图 3(c) 所示，用以考察端柱和墙体塑性发展规律。



(a) 位移计、力传感器布置图



(b) 钢板应变片布置

(c) 钢筋应变片布置

图 3 试件测点布置图

Fig.3 Measurement points arrangement of specimens

2 试验现象

为便于描述试验现象，定义水平千斤顶向北(N)推加载梁为正向，向南(S)拉加载梁为负向。5 个试件加载制度基本相同，破坏过程和破坏形态也比较相似。可以将各试件受力全过程分为如下 4 个阶段。

1) 弹性工作阶段。

试件无明显现象，墙体钢板与混凝土协同工作；顶点水平力-位移关系曲线基本呈线性变化。各

试件该阶段的临界荷载分别为 628.6kN、691.4kN、643.9kN、756.8kN 和 811.6kN(分别占各自试件峰值荷载的 63%、72%、65%、74%、82%)。

2) 钢板与混凝土界面破坏阶段。

弹性工作阶段之后,试件刚度开始降低,墙体钢板与混凝土界面黏结作用开始发生局部破坏,有轻微“沙沙”声,此时荷载-位移曲线出现较明显转折,水平荷载分别达 792.2kN、833.7kN、791.6kN、887.5kN 和 885.8kN(各占相应峰值荷载的 79%、87%、80%、87%和 90%),位移角分别为 1/183、1/144、1/179、1/130 和 1/132。可以看出:CSW-5、CSW-6、CSW-8 轴压比相同,距厚比依次减小,其弹性阶段临界荷载、钢板与混凝土界面破坏对应的荷载均依次增大;CSW-7~CSW-9 距厚比相同,轴压比依次增大,其弹性阶段临界荷载、钢板与混凝土界面破坏对应的荷载基本依次增大。

3) 屈服阶段。

该阶段为荷载-位移曲线从明显转折点持续到峰值点,以钢管混凝土端柱和墙体钢板的屈曲为主要现象。各试件端柱在平均位移角约 1/120 时发生屈曲,并随着轴压比增大,端柱屈曲对应的位移角减小;各试件墙体钢板在平均位移角约 1/83 时发生屈曲。钢板初始局部屈曲受距厚比影响比较明显:距厚比较大( $r=50$ )时,钢板发生沿墙体 45°对角线方向的剪切屈曲波形,如图 4(a)所示;距厚比较小( $r \leq 33$ )时,局部屈曲发生在墙体靠近端柱的角部,范围很小,如图 4(b)所示。各试件墙体钢板发生初始屈曲后,水平荷载继续增长,在平均位移角约 1/72 时,达峰值荷载。

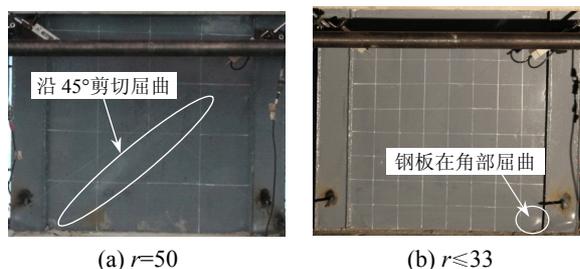


图 4 钢板初始屈曲形态

Fig.4 Initial buckling form of steel plates

4) 破坏阶段。

各试件达峰值荷载之后,随着水平位移的增加,墙体内部混凝土破坏加剧,刚度降低,水平剪力在钢板和混凝土板之间发生重分布,钢板分担的剪力增加,出现了多条新的屈曲波形,后续屈曲与初始屈曲基本平行;端柱钢管屈曲加重,出现多处

压屈波形,钢管脚部焊缝开裂,内部混凝土压溃,试件竖向变形不断增大。各试件最终水平荷载降至 70%以下时,停止加载,试件最终破坏形态图 5 所示。可以看出:随着距厚比  $r$  减小,钢板屈曲的角度越小;而轴压比对试件最终破坏形态影响较小,轴压比设计值可达 0.7。

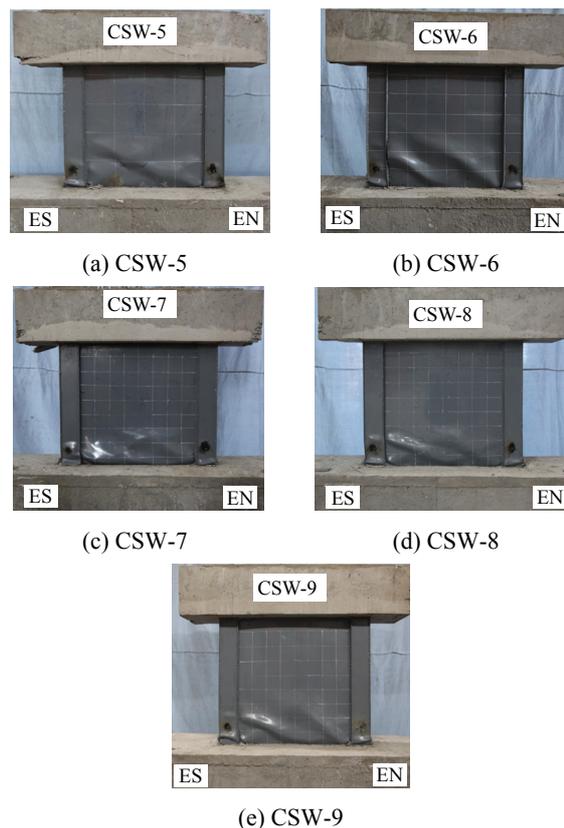


图 5 试件破坏过程及破坏形态

Fig.5 Failure process and pattern of specimens

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 滞回曲线

CSW-5~CSW-9 的顶点水平力  $P$ -位移  $\Delta$ (位移角  $\theta$ )滞回曲线如图 6 所示。可以看出,滞回曲线比较饱满,呈梭形。在受力初期,各试件滞回曲线为一条直线,基本无残余变形,处于弹性工作状态。随着加载位移增大,混凝土开裂、钢板局部屈曲,试件刚度下降,卸载后残余变形逐渐增大,但水平荷载不断增长。达峰值荷载后,试件承载力下降缓慢。在位移角约为 0.025(1/40)时,承载力降至 630kN 以上,残余承载力很高。总体来看,距厚比和轴压比对滞回曲线有一定影响:距厚比较大( $r=50$ )时,滞回曲线饱满程度最低,而当  $r \leq 33$  时,滞回曲线影响比较相似;轴压比较小( $n=0.4$ )时,滞回曲线也最饱满,轴压比较大( $n=0.5$ 、 $n=0.7$ )时,滞回曲线比较

相似。

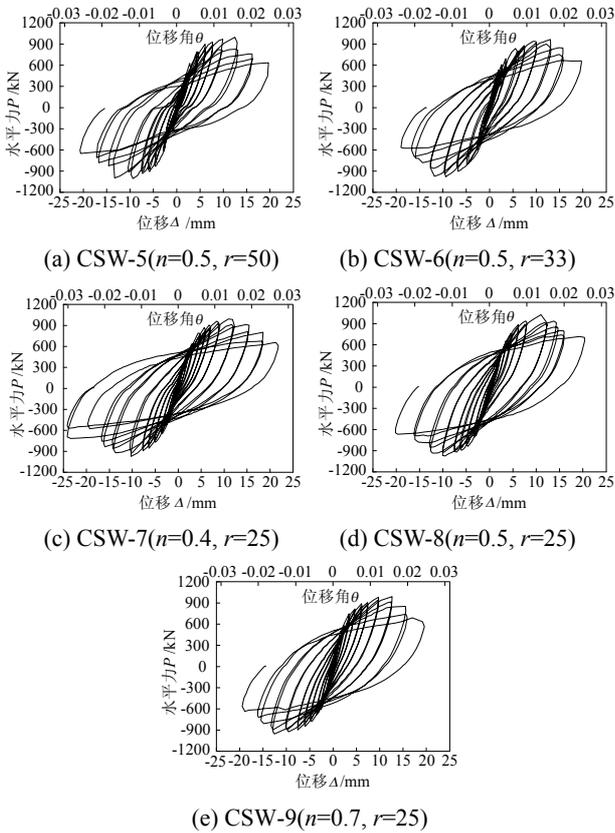


图6 试件顶点水平力-位移滞回曲线

Fig.6 Top lateral force-displacement hysteretic loops of specimens

3.2 骨架曲线

各试件顶点水平力-位移骨架曲线如图7所示。各试件骨架曲线均为倒S形，表明试件的受力过程分弹性、塑性和破坏退化三个阶段。CSW-5、CSW-6、CSW-8骨架曲线基本重合，正向峰值荷载CSW-8略高于其他两个试件，主要是由于该试件距

厚比最小，钢板初始屈曲晚于其他试件，且峰值荷载时钢板屈曲的程度也较低。钢板在墙体角部受力最大，但该处混凝土开裂、破碎也较严重，对栓钉的锚固作用降低；此外薄钢板焊接栓钉质量较难保证，在受力较大的部位，栓钉拉断。综上两个原因，栓钉对钢板约束作用降低，距厚比对试件受力性能影响减弱。CSW-7~CSW-9骨架曲线在峰值荷载前基本重合，可见轴压比对试件极限承载力影响很小；主要区别在峰值荷载后：轴压比增大，钢板局部屈曲加重，曲线下降变陡，变形能力降低。

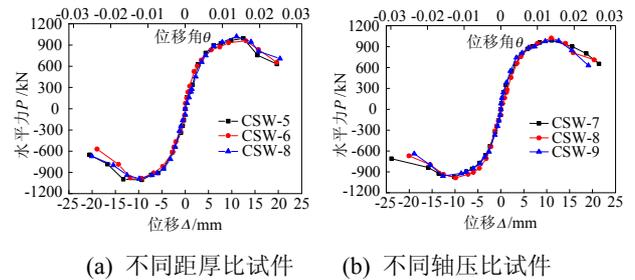


图7 试件顶点水平力-位移骨架曲线

Fig.7 Top lateral force-displacement skeleton curves

3.3 承载能力

为便于对比分析，采用应用较为普遍的几何作图法<sup>[8]</sup>确定屈服点；按峰值荷载下降15%确定极限点，即破坏荷载  $P_d=0.85P_u$  对应的位移定为有效破坏位移  $\Delta_d$ 。各试件按照该方法确定的名义屈服荷载  $P_y$ 、名义屈服位移  $\Delta_y$ 、峰值荷载  $P_u$ 、峰值荷载对应的位移  $\Delta_u$ 、破坏荷载  $P_d$ 、有效破坏位移  $\Delta_d$  如表3所示。将各试件平均屈服位移、平均极限位移、平均有效破坏位移与试件高度的比值分别作为屈服位移角、极限位移角、有效破坏位移角，如表4所示。

表3 屈服状态、极限状态、破坏状态对应的荷载和位移

Table 3 Load and displacement of yield, ultimate, failure state

试件编号	加载方向	屈服状态		极限状态		破坏状态		位移延性系数 $\Delta_d/\Delta_y$
		名义屈服荷载 $P_y$ /kN	名义屈服位移 $\Delta_y$ /mm	峰值荷载 $P_u$ /kN	峰值荷载对应的位移 $\Delta_u$ /mm	破坏荷载 $P_d$ /kN	有效破坏位移 $\Delta_d$ /mm	
CSW-5	正向	867.7	5.5	997.6	12.5	848.0	14.3	2.6
	负向	833.3	4.7	1003.7	9.3	853.1	15.7	3.3
CSW-6	正向	762.3	4.5	963.8	13.0	819.3	16.2	3.6
	负向	816.1	4.8	981.4	9.4	834.2	13.7	2.9
CSW-7	正向	802.3	4.7	990.5	11.1	842.0	17.6	3.7
	负向	796.6	5.0	972.8	10.1	826.9	16.5	3.3
CSW-8	正向	892.7	6.3	1024.6	11.0	870.9	15.1	2.4
	负向	870.1	5.1	985.0	9.6	837.3	14.7	2.9
CSW-9	正向	767.2	3.8	984.2	12.6	836.6	15.6	4.1
	负向	762.9	4.4	959.2	12.6	815.3	15.2	3.5

表 4 屈服状态、极限状态、破坏状态对应的位移角  
Table 4 Displacement angle of yield, ultimate, failure state

试件编号	屈服位移角	极限位移角	有效破坏位移角
CSW-5	1/156	1/73	1/53
CSW-6	1/172	1/71	1/54
CSW-7	1/165	1/75	1/47
CSW-8	1/140	1/78	1/54
CSW-9	1/195	1/63	1/52

对比表 3、表 4 中数据，可以得出以下结论：CSW-5~CSW-9 峰值荷载相差很小，表明距厚比、轴压比对剪跨比为 1 的双钢板-混凝土组合剪力墙的峰值荷载影响较小；各试件平均极限位移角约为 1/72，非常接近，极限位移角与屈服位移角之比基本大于 2，表明试件在达峰值荷载前经历有较长的变形过程，具有明显征兆；各试件平均有效破坏位移角约为 1/52，表明双钢板-混凝土组合剪力墙具有良好的变形能力。

### 3.4 位移延性系数

通常采用位移延性系数作为衡量结构延性的量化参数，其值为有效破坏位移 $\Delta_d$ 与屈服位移 $\Delta_y$ 之比<sup>[9-10]</sup>。各试件位移延性系数如表 3 所示，由表 3 中结果可知：各试件位移延性系数基本大于 3，具有良好延性性能。CSW-5 和 CSW-8 正向位移延性系数小于 3 较多，主要是由于屈服位移计算值较大，而有效破坏位移较接近，导致位移延性系数计算较小。对于变形能力高的试件，建议采用变形绝对值(如水平位移角)作为度量其变形能力的指标。

### 3.5 刚度退化

环线刚度为同一位移幅值下多次加载循环的平均荷载与平均位移的比值，常用以表征结构刚度退化<sup>[9-10]</sup>。各试件环线刚度随着位移加载幅值变化的关系曲线如图 8 所示。

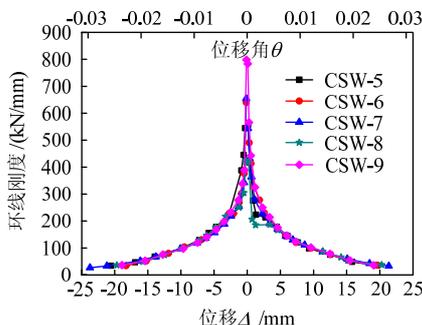


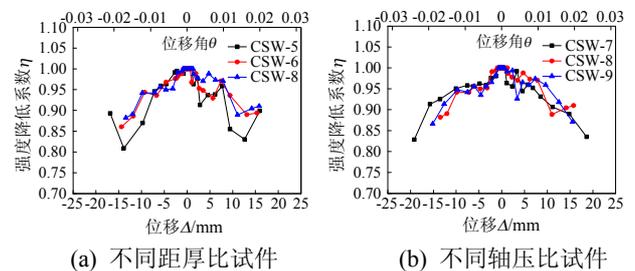
图 8 各试件刚度退化曲线  
Fig.8 Stiffness degradation of specimens

由图 8 可以看出：整个加载过程中各试件刚度退化持续、均匀，表明双钢板-混凝土组合剪力墙受力性能比较稳定；各试件刚度退化关系曲线基本重

合，表明轴压比设计值为 0.5~0.7、距厚比为 25~50 范围内，双钢板-混凝土组合剪力墙刚度退化受二者影响很小；轴压比较高时，试件通常具有更大的初始刚度。

### 3.6 强度退化

强度降低系数 $\eta$ 为同一位移幅值下最后一次循环的峰值点荷载值与第一次循环的峰值点荷载值之比，常用以表征试件的强度退化<sup>[9-10]</sup>。各试件强度退化曲线如图 9 所示，可以看出：各试件强度降低系数在整体上表现出随位移角增加而减小的特点，表明强度退化随着往复加载而不断加剧；强度降低系数随距厚比增大呈明显降低趋势，主要原因是距厚比越大，钢板愈容易屈曲、栓钉破坏对试件的承载力的影响越严重；强度降低系数随轴压比增大，也相对加重。



(a) 不同距厚比试件 (b) 不同轴压比试件

图 9 各试件强度退化曲线

Fig.9 Strength degradation of specimens

### 3.7 耗能能力

基于试件荷载-位移滞回曲线，可以定量计算出每半周试件耗散的能量，由此可对试件的耗能能力进行综合评估<sup>[9-10]</sup>。等效黏性阻尼系数 $\xi_{eq}$ 按下式计算：

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{A_{FBE} + A_{FDE}}{A_{AOB} + A_{COD}} \quad (1)$$

式中： $A_{FBE}+A_{FDE}$  为一个滞回环包围的面积； $A_{AOB}+A_{COD}$  为相应的三角形面积，见图 10。

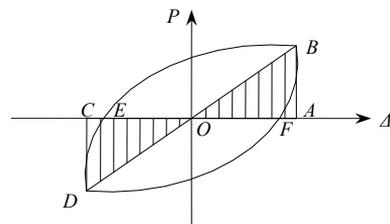


图 10 等效黏性阻尼系数计算图

Fig.10 Calculation chart of equivalent hysteretic damping coefficient

计算等效黏性阻尼系数-顶点位移曲线、耗能-半周数、累积耗能-半周数曲线，如图 11~图 13 所

示。由图 11 分析可知, 试件等效黏性阻尼系数随着加载周数的增加近似呈线性增长趋势(在加载位移较小时, 图 10 中三角形面积较小, 试验设备及量测仪器引起相对误差较高, 导致等效黏性阻尼系数失真); 各试件  $\xi_{eq}$  基本增大至 0.3; 随着距厚比的减小,  $\xi_{eq}$  呈增长趋势; 而轴压比对  $\xi_{eq}$  的影响不明显。由图 12、图 13 分析可知, 随着加载循环次数增加, 试件耗能不断增加, 进入弹塑性阶段后, 各试件累积耗能呈指数增长趋势, 表明良好的耗能能力; 试件耗能随距厚比增大而有所降低, CSW-9 耗能与 CSW-8 基本相同, 表明轴压比 0.7 是可取的。

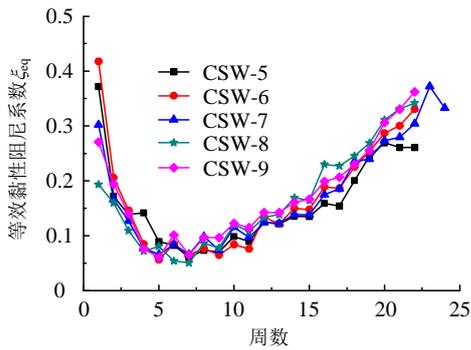


图 11 等效黏性阻尼系数-周数曲线

Fig.11 Equivalent hysteretic damping coefficient versus number of cycles

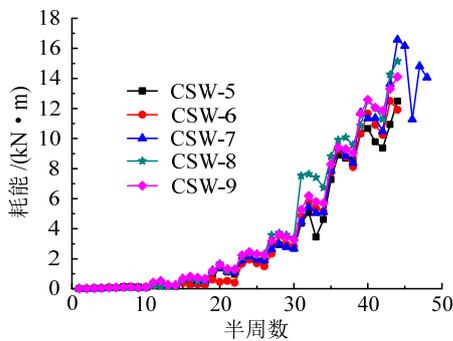


图 12 耗能-半周数曲线

Fig.12 Energy consumed versus number of half cycles

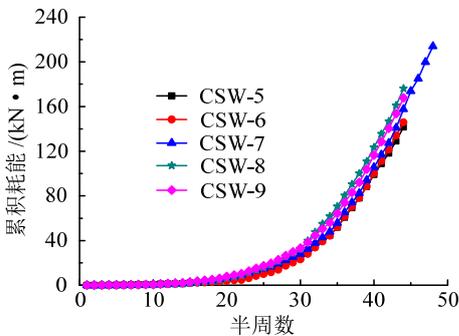


图 13 累积耗能-半周数曲线

Fig.13 Accumulated energy consumed versus number of half cycles

## 4 结论

通过 5 片高轴压比、低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙的试验研究与分析, 得到双钢板-混凝土组合剪力墙受力特点、破坏形态和抗震性能的相关结论如下:

(1) 低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙具有良好的承载力、抗侧刚度、延性、耗能能力, 是一种抗震性能优越的剪力墙。

(2) 弹性阶段临界荷载、钢板与混凝土界面破坏对应的荷载随距厚比增大而减小, 随轴压比增大而增大。

(3) 各试件墙体钢板在平均位移角约 1/83 时发生屈曲, 高于规范对剪力墙的弹塑性位移角限值; 且钢板初始局部屈曲受距厚比影响明显。

(4) 距厚比( $r \leq 50$ )、轴压比( $n \leq 0.7$ )对剪跨比为 1 的双钢板-混凝土组合剪力墙的峰值荷载、位移延性系数、刚度退化影响较小; 各试件平均极限位移角达 1/72、平均有效破坏位移角达 1/52, 位移延性系数基本大于 3, 具有良好的变形能力。

(5) 试件滞回性能稳定性随距厚比增大而降低, 受轴压比的影响不显著。

(6) 建议低剪跨比双钢板-混凝土组合剪力墙轴压比限值取 0.7。

### 参考文献:

- [1] 孙建超, 徐培福, 肖从真, 等. 钢板-混凝土组合剪力墙受剪性能试验研究[J]. 建筑结构, 2008, 38(6): 1-10.  
Sun Jianchao, Xu Peifu, Xiao Congzhen, et al. Experimental study on shear behavior of steel plate-concrete composite wall [J]. Building Structure, 2008, 38(6): 1-10. (in Chinese)
- [2] 吕西林, 干淳洁, 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.  
Lü Xilin, Gan Chunjie, Wang Wei. Study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete shear walls [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 89-96. (in Chinese)
- [3] Zhao Q H, Abolhassan A A. Cyclic behavior of traditional and innovative composite shear wall [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 130(2): 271-285.
- [4] 曹万林, 张建伟, 董宏英, 等. 内藏桁架混凝土组合高剪力墙抗震性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(4): 153-158.  
Cao Wanlin, Zhang Jianwei, Dong Hongying, et al. Seismic performance of high-rise shear wall with concealed truss [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(4): 153-158. (in Chinese)

(参考文献[5]-[10]转第 76 页)

- reinforced-concrete cooling towers: Buckling or ultimate load [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1983, 5(3): 163—180.
- [14] Noh H C. Nonlinear behavior and ultimate load bearing capacity of reinforced concrete natural draught cooling tower shell [J]. *Engineering Structures*, 2006, 28(3): 399—410.
- [15] Noh H C. Ultimate strength of large scale reinforced concrete thin shell structures [J]. *Thin-Wall Structures*, 2005, 43(9): 1418—1443.
- [16] Cole P P, Abel J F, Billington D P. Buckling of cooling-tower shells: State-of-the-art [J]. *Journal of the Structural Division*, ASCE, 1975, 101(6): 1185—1203.
- [17] 张军锋, 葛耀君, 赵林. 基于风洞试验的双曲冷却塔静风整体稳定研究[J]. *工程力学*, 2012, 29(5): 68—77.  
Zhang Junfeng, Ge Yaojun, Zhao Lin. Study on global aerostatic stability of hyperboloidal cooling towers based on the wind tunnel tests [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(5): 68—77. (in Chinese)
- [18] 汉佩. 冷却塔[M]. 胡贤章(译). 北京: 电力工业出版社, 1980: 139—150.  
Hampe E. *Cooling towers* [M]. Translated by Hu Xianzhang. Beijing: Electric Power Industry Press, 1980: 139—150. (in Chinese)
- [19] 张军锋, 葛耀君, 赵林. 双曲冷却塔下部子午线形对结构性能的影响[J]. *建筑结构*, 2012, 42(2): 118—121.  
Zhang Junfeng, Ge Yaojun, Zhao Lin. Effect of bottom meridian curve on the mechanics behavior of hyperboloidal cooling towers [J]. *Building Structure*, 2012, 42(2): 118—121. (in Chinese)
- [20] DL/T 5339-2006, 火力发电厂水工设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.  
DL/T 5339-2006, Code for hydraulic design of fossil fuel power plants [S]. Beijing: Chinese Electronic Power Press, 2006. (in Chinese)
- [21] Eckstein U, Harte R, Krätzig W B, Wittek U. Simulation of static and kinetic buckling of unstiffened and stiffened cooling tower shells [J]. *Engineering Structures*, 1987, 9(1): 9—18.
- [22] Busch D, Harte R, Niemann H J. Study of a proposed 200m high natural draught cooling tower at power plant Frimmersdorf/Germany [J]. *Engineering Structures*, 1998, 20(10): 920—927.
- [23] 鲍侃袁. 大型双曲冷却塔的风荷载和风致响应理论分析与试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.  
Bao Kanyuan. Theoretical and experimental research on wind load and wind induced response of large hyperbolic cooling towers [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese)

(上接第 66 页)

- [5] 钱稼茹, 魏勇, 赵作周, 等. 高轴压比钢骨混凝土剪力墙抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2008, 29(2): 43—50.  
Qian Jiuru, Wei Yong, Zhao Zuozhou, et al. Experimental study on seismic behavior of SRC shear walls with high axial force ratio [J]. *Journal of Building Structures*, 2008, 29(2): 43—50. (in Chinese)
- [6] Link R A, Elwi A E. Composite concrete-steel plate walls: analysis and behavior [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995, 121(2): 260—271.
- [7] Emori K. Compressive and shear strength of concrete filled steel box wall [J]. *Steel Structures*, 2002, 68(2): 29—40.
- [8] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 337.  
Guo Zhenhai, Shi Xudong. *Reinforced concrete theory and analyse* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 337. (in Chinese)
- [9] 唐九如. 钢筋混凝土框架节点抗震[M]. 南京: 东南大学出版社, 1989: 312—316.  
Tang Jiuru. *Seismic behavior of reinforced concrete frame joint* [M]. Nanjing: Dongnan University Press, 1989: 312—316. (in Chinese)
- [10] 樊健生, 陶慕轩, 聂建国, 等. 钢骨混凝土柱-钢桁梁组合节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2010, 31(2): 1—10.  
Fan Jiansheng, Tao Muxuan, Nie Jianguo, et al. Experimental research on seismic behavior of steel reinforced concrete column-steel truss beam composite joints [J]. *Journal of Building Structures*, 2010, 31(2): 1—10. (in Chinese)