

引用格式:张哲畅,王臣垒,乔文涛,等. 钢丝网架夹芯混凝土复合墙结构轴心受压承载力试验研究[J]. 工业建筑, 2025, 55(4): 57-62.  
ZHANG Zhechang, WANG Chenlei, QIAO Wentao, et al. Experimental Research on Bearing Capacity of Insulated Sandwich Concrete Wall Structures Under Axial Compression[J]. Industrial Construction, 2025, 55(4): 57-62 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG23032716

## 钢丝网架夹芯混凝土复合墙结构轴心受压承载力试验研究\*

张哲畅<sup>1</sup> 王臣垒<sup>1</sup> 乔文涛<sup>1</sup> 尹晓祥<sup>2</sup> 苑加伟<sup>3</sup>

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 河北北方绿野建筑设计有限公司, 石家庄 050011; 3. 中铁华铁工程设计集团有限公司, 北京 100071)

**摘 要** 钢丝网架混凝土夹芯墙(ISCW)是一种新型的组合结构, 主要由膨胀聚苯乙烯板、钢丝和混凝土层组成。考虑混凝土层厚度、钢丝间距和混凝土强度3个变化参数, 制作了6个足尺试件进行轴心受压试验, 试验破坏特征表现为试件中部或下部产生裂缝, 随后裂缝向下发展, 试件劈裂, 底部混凝土破坏。试验结果表明: 随着混凝土层厚度增大, 其对试件极限承载力及轴向刚度影响显著, 最大增幅为35%和65%; 提升混凝土强度对试件极限承载力及轴向刚度也有所提高, 最大增幅为36%和27%; 钢丝间距的增大对试件的极限承载力无明显影响, 对试件的轴向刚度影响明显, 降幅达25%, 钢丝间距越小, 结构延性越大。

**关键词** 组合结构; 钢丝网架混凝土夹芯墙; 轴压承载力; 荷载试验

### Experimental Research on Bearing Capacity of Insulated Sandwich Concrete Wall Structures Under Axial Compression

ZHANG Zhechang<sup>1</sup> WANG Chenlei<sup>1</sup> QIAO Wentao<sup>1</sup> YIN Xiaoxiang<sup>2</sup> YUAN Jiawei<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. NGREEN Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang 050011, China; 3. China Rail Way Huatie Engineering Design Group Co., Ltd., Beijing 100071, China)

**Abstract:** The insulated sandwich concrete wall (ISCW) is a new type of composite structure, which is mainly composed of expanded polystyrene sheets, steel wires and concrete layers. In order to investigate the influence of concrete layer thickness, steel wire spacing and concrete strength, six full-scale ISCW were fabricated for axial compression loading tests. The failure characteristics of the tests were as follows: cracks occurred in the middle or lower part of the specimen, then the cracks developed downward, the specimen split, and the bottom concrete was damaged. The test results indicated that as the thickness of the concrete layer increased, it significantly affected the ultimate bearing capacity and axial stiffness of the specimens, with maximum increments of 35% and 65%, respectively. Additionally, higher concrete strength enhanced the ultimate bearing capacity and axial stiffness of the specimens, with maximum increments of 36% and 27%, respectively. The increase in steel wire spacing had no pronounced effect on the ultimate bearing capacity of the specimens, but it significantly influenced axial stiffness, resulting in a reduction of 25%. Smaller steel wire spacing corresponded to greater structural ductility.

**Keywords:** composite structure; insulated sandwich concrete wall; bearing capacity under axial compression; load test

\* 河北省杰出青年科学基金项目(E2022210084)。

第一作者: 张哲畅, 硕士研究生, 主要从事装配式建筑结构方面的研究。

通信作者: 乔文涛, 主要从事创新结构与智能建造方面的研究, qwt@stdu. edu. cn。

收稿日期: 2023-03-27

0 引言

夹芯墙由外结构层和芯层组合而成,不同于普通钢筋混凝土墙,夹芯墙不仅能抵抗施加在其上的荷载,且夹芯层的存在可以维持建筑物内部温度,从而减少热量散失,节约能源。一些学者对其静力性能做了一定的试验研究<sup>[1-3]</sup>。Mugahed等<sup>[4]</sup>对6个预制泡沫混凝土夹芯板(PFCSPs)进行了足尺试验以研究面板在轴向荷载下的力学性能,试验现象和数据表明:直至夹芯板整体破坏,面板基本上还表现为完全复合的状态,同时观察到保温层上的应变存在微小的不连续性,且承载力随着长细比的增加而产生非线性的降低。除此之外,一些学者对夹芯墙进行了抗震性能研究<sup>[5-8]</sup>。Lu等<sup>[9]</sup>对3个预制新型L形保温夹芯混凝土剪力墙与现浇墙体进行对比,结果表明:预制试件具有良好的承载能力和变形能力。Ricci等<sup>[10]</sup>将波浪形泡沫保温板作为夹芯层对夹芯墙进行抗震性能试验研究,结果表明:夹芯板的抗震性能与普通预制板或现浇板相当。

上述研究均对夹芯墙板进行了一定的创新性研究,提出了不同种类的夹芯墙板,但依然存在一些待解决的问题,如夹芯墙在转角处的泡沫不连续带来的热桥问题以及在广大农村尤其是发展中国家的农村使用成本较高。Qiao等<sup>[11]</sup>对现有的夹芯墙板进行了改进,提出了钢丝网架混凝土夹芯墙(ISCW)。它采用钢丝网和斜插丝构成的钢丝骨架与混凝土结合共同承担荷载,同时设置混凝土构造柱提高抗震性能;在转角处采用减小截面的组合异形柱,既保证了受力性能又解决了转角处的热桥问题。Qiao等<sup>[12-14]</sup>开展了大量的拟静力试验研究以及地震模拟振动台试验研究,结果表明:结构具有一定的延性和耗能能力,且整体刚度较大,具有良好的抗震性能,该结构的适用高度为3层住宅建筑,成本较传统夹芯墙结构降低至少20%,尤其适用于广大农村低成本建筑。本文所研究的ISCW是类似于砌体结构的墙体承重结构,因此,除了研究其在水平荷载作用下的力学性能外,其竖向荷载作用下的轴心受力性能也至关重要。为了揭示其轴压下的力学性能,对ISCW开展轴压作用下的试验研究和理论分析。

1 试验方案

1.1 试件设计

试验考虑了3个研究参数——混凝土层厚度 $t$ 、

钢丝间距 $s$ 和混凝土强度等级,共设计了6个足尺轴心受压试件,设计参数如表1所示,其中ISCW-1为参照试件。所有试件的高度均为1500 mm,墙体宽度为330 mm,钢丝直径均为2.5 mm,设计详图如图1所示。

表1 试件设计参数  
Table 1 Design parameters of specimens

| 试件编号   | 混凝土层厚度 $t$<br>mm | 钢丝间距 $s$<br>mm | 混凝土强度等级 |
|--------|------------------|----------------|---------|
| ISCW-1 | 75               | 50             | C30     |
| ISCW-2 | 65               | 50             | C30     |
| ISCW-3 | 85               | 50             | C30     |
| ISCW-4 | 75               | 100            | C30     |
| ISCW-5 | 75               | 50             | C20     |
| ISCW-6 | 75               | 50             | C40     |

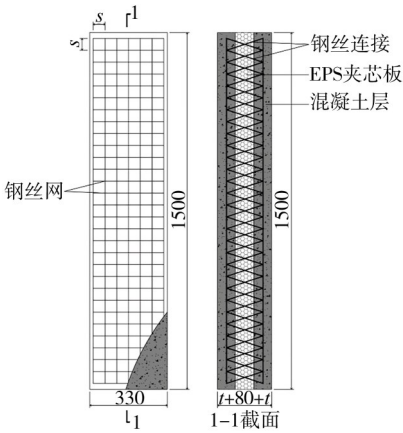


图1 ISCW设计详图 mm  
Fig. 1 ISCW design details

1.2 材料属性

依据GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[15]</sup>对试件制作过程中预留的混凝土试块进行轴心抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验;依据标准GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》<sup>[16]</sup>对预留的低碳镀锌钢丝进行了拉伸试验,如图2所示。测试结果见表2。

1.3 试验装置与加载制度

在实际工程中试件下端与基础连接,上端与楼板连接。由于试验环境限制,采用保守设计的简化试验模型,如图3所示,试验加载装置由反力架、液压作动器和分配梁等组成。在试件顶部两侧布置2个位移计用于测量试件竖向位移,试件顶部布置力传感器用于测量、监测荷载;此外,试件厚度方向为南北向,宽度方向为东西向。试验采用力与位移混合控制加载,加载初期每级荷载增量为



(a)混凝土轴心受压试验 (b)混凝土劈裂抗拉试验



(c)低碳镀锌钢丝拉伸试验

图2 材料性质试验

Fig. 2 Material property test

表2 材料特性

Table 2 Material properties

| 材料特性                               | 牌号  | 数值/MPa | 测试标准                                           |
|------------------------------------|-----|--------|------------------------------------------------|
| 混凝土轴心<br>受压强度( $f_{cp}$ )          | C20 | 24.39  | GB/T 50081—2019                                |
|                                    | C30 | 34.36  | 《混凝土物理力学性能<br>试验方法标准》                          |
|                                    | C40 | 44.69  |                                                |
| 混凝土劈裂<br>抗拉强度( $f_{ts}$ )          | C20 | 1.84   |                                                |
|                                    | C30 | 2.40   |                                                |
|                                    | C40 | 2.71   |                                                |
| 低碳镀锌钢丝条<br>件屈服强度( $f_{sy}^{0.2}$ ) | —   | 435    | GB/T 228.1—2021《金<br>属材料 拉伸试验 第1<br>部分:室温试验方法》 |
| 低碳镀锌钢丝<br>抗拉强度( $f_{su}$ )         | —   | 549    |                                                |

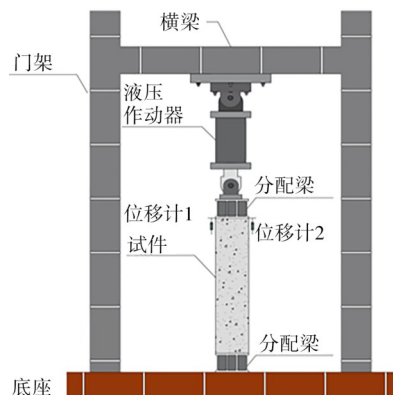


图3 试验装置示意

Fig. 3 Schematic of the test set-up

100 kN,当试件屈服后采用位移加载,每级0.5 mm,直至荷载下降至记录的最大荷载值的85%时终止。

## 2 试验现象

ISCW-1采用C30混凝土,钢丝间距为50 mm,混凝土板厚为75 mm,峰值荷载( $F_{p1}$ )为980 kN。加载初期,试件无明显变化。当加载至570 kN( $0.58F_{p1}$ )时,试件北侧中部出现1条水平裂缝。当荷载加载到690 kN( $0.70F_{p1}$ )时,在试件南、北侧上部同时出现1条竖向裂缝。当加载至850 kN( $0.86F_{p1}$ )时,在试件南、北侧端部出现多条竖向裂缝。继续加载至900 kN( $0.91F_{p1}$ ),在试件西侧中部出现水平裂缝,试件北侧上部竖向裂缝继续发展,沿着保温层向下延伸,当荷载加载至峰值荷载980 kN( $F_{p1}$ )时,试件西侧中部混凝土发生劈裂,最终构件失效,荷载迅速下降,当荷载下降至峰值荷载的85%时停止试验,如图4(a)所示。

ISCW-2采用C30混凝土,钢丝间距为50 mm,混凝土板厚为65 mm,峰值荷载( $F_{p2}$ )为721 kN。加载初期,试件无明显变化。当加载至570 kN( $0.80F_{p2}$ )时,在试件西侧中部和下部各出现1条水平裂缝,在试件东侧下部角端出现1条水平裂缝并在角端产生竖向裂缝,在试件南侧和北侧下部各出现1条水平裂缝。继续加载,西侧下部水平裂缝逐渐贯通,当荷载加载至峰值荷载721 kN( $F_{p2}$ )时,试件西侧下部混凝土发生劈裂,最终构件失效,荷载迅速下降,当荷载下降至峰值荷载的85%时停止试验,如图4(b)所示。

ISCW-3采用C30混凝土,钢丝间距为50 mm,混凝土板厚为85 mm,峰值荷载( $F_{p3}$ )为1103 kN。加载初期,试件无明显变化。当荷载加载至850 kN( $0.77F_{p3}$ )时,在试件西侧下部出现1条水平裂缝。当加载到1040 kN( $0.92F_{p3}$ )时,在试件南北侧下部出现多条细小的竖向裂缝,试件西侧下部产生1条水平裂缝。继续加载,在试件南、北侧出现多条水平和竖向裂缝,西侧水平裂缝继续发展,试件东侧产生2条竖向裂缝,当荷载加载至峰值荷载1103 kN( $F_{p3}$ )时,试件西侧下部混凝土发生劈裂,北侧下部角端混凝土被压碎,最终构件失效,荷载迅速下降,当荷载下降至峰值荷载的85%时停止试验,如图4(c)所示。

ISCW-4采用C30混凝土,钢丝间距为100 mm,混凝土板厚为75 mm,峰值荷载( $F_{p4}$ )为1020 kN。加载初期,试件无明显变化。当荷载加载至620 kN( $0.61F_{p4}$ )时,在试件南侧上部和北侧下部各出现1条水平裂缝。当加载到840 kN( $0.82F_{p4}$ )时,在试件

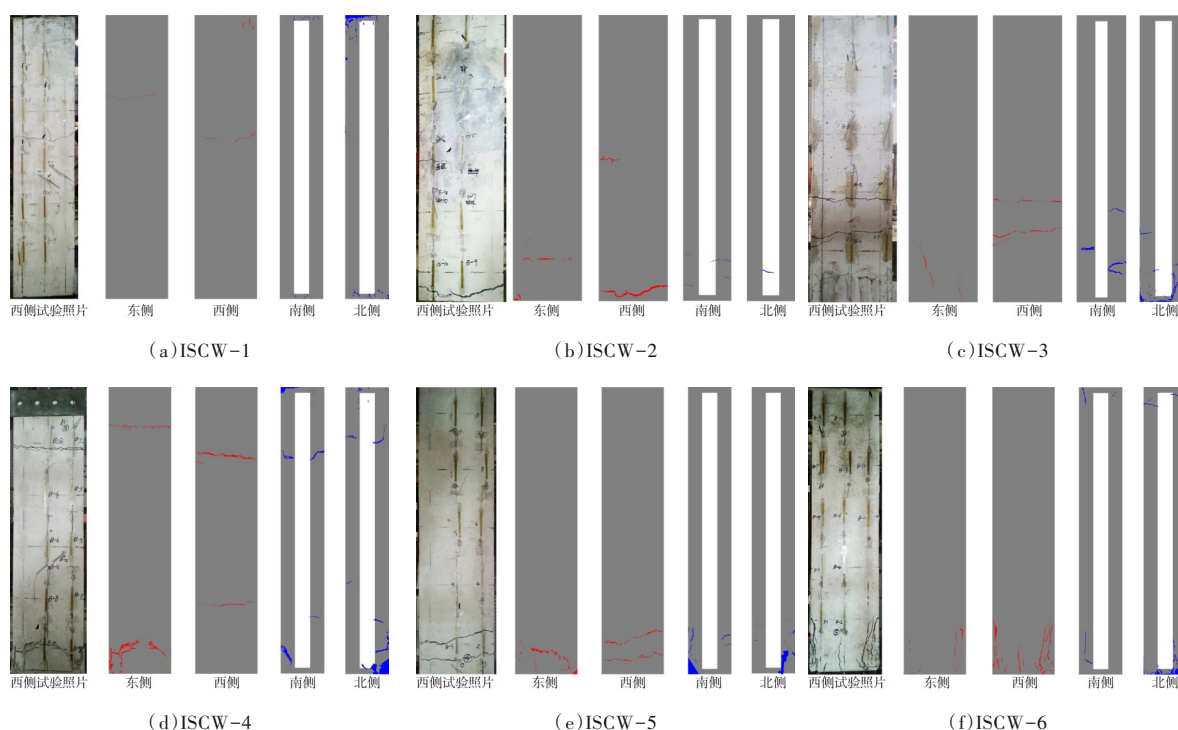


图4 试件破坏模式

Fig. 4 Specimen crack patterns

西侧中上部和中下部同时出现1条水平裂缝,在试件东侧下部及上部各产生1条水平裂缝。继续加载,在试件南、北侧出现多条竖向裂缝和2条水平裂缝,当荷载加载至峰值荷载1020 kN( $F_{p4}$ )时,试件西侧上部和下部混凝土发生劈裂,北侧下部角端混凝土被压碎,最终构件失效,荷载迅速下降,当荷载下降至峰值荷载的85%时停止试验,如图4(d)所示。

ISCW-5采用C20混凝土,钢丝间距为50 mm,混凝土板厚为75 mm,峰值荷载( $F_{p5}$ )为720 kN。加载初期,试件无明显变化。当荷载加载到570 kN( $0.79F_{p5}$ )时,在试件西侧下部出现一条水平裂缝。继续加载,试件南侧下部、北侧上部出现多条竖向裂缝,西侧水平裂缝继续发展并产生第二条水平裂缝,东侧下端产生斜裂缝。当荷载加载至峰值荷载720 kN( $F_{p5}$ )时,试件西侧下部混凝土发生劈裂,北侧下角端混凝土被压碎,最终构件失效,当荷载下降至峰值荷载的85%时停止试验,如图4(e)所示。

ISCW-6采用C40混凝土,钢丝间距为50 mm,混凝土板厚为75 mm,峰值荷载( $F_{p6}$ )为1295 kN。加载初期,试件无明显变化。当荷载加载到620 kN( $0.57F_{p6}$ )时,在试件北侧下部出现1条由东向西的斜向裂缝。继续加载,在试件南、北侧上部出现水平裂缝及竖向裂缝,当荷载加载到1150 kN

( $0.89F_{p6}$ )时,在试件东、西侧下部产生多条竖向裂缝。当荷载加载至峰值荷载1295 kN( $F_{p6}$ )时,试件西北侧下部混凝土被压碎,最终构件失效,荷载迅速下降,当荷载下降至峰值荷载的85%时停止试验,如图4(f)所示。

试验的6个试件均以相同的方式进行加载,在试验过程中试件均未出现明显的屈服阶段,试件开裂荷载紧邻峰值荷载,在轴向荷载作用下试件表面混凝土出现裂缝,随后裂缝迅速开展,局部混凝土脱落,构件失效。试件破坏过程短暂,整体呈脆性破坏。

### 3 试验结果

#### 3.1 荷载-位移曲线

根据试件顶部的位移量测值,可计算出平面的轴向位移净值 $\Delta_A$ ,见式(1):

$$\Delta_A = \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} \quad (1)$$

式中: $\Delta_1$ 和 $\Delta_2$ 分别由位移计1、位移计2测量得到。

轴向荷载与轴向变形净值的关系曲线如图5所示。可以看出:

1) ISCW-2、ISCW-1和ISCW-3的混凝土层厚度 $t$ 分别为65、75、85 mm,钢丝间距和混凝土强度相

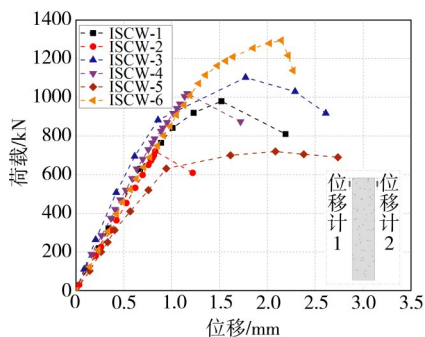


图5 荷载-位移关系曲线

Fig. 5 Load-displacement curves

同。随着混凝土层厚度由 65 mm 增大至 85 mm, 试件的峰值荷载分别提高了 35% 和 12%。加载初期, 3 个试件的荷载-位移曲线均呈线性变化, 继续加载, 荷载-位移曲线的曲率减小, 达到峰值荷载后, 强度下降相对较缓, 表明混凝土板的厚度越大, 试件的承载力越大, 达到峰值荷载后, 荷载下降相对较缓。为保证结构承载能力, 建议混凝土层厚度不小于 150 mm。

2) ISCW-1 和 ISCW-4 的钢丝间距  $s$  分别为 50、100 mm, 混凝土层厚度和混凝土强度相同。随着钢丝间距由 50 mm 增大至 100 mm, 试件的峰值荷载无明显变化。加载初期, 2 个试件的荷载-位移曲线呈线性变化, 达到峰值荷载后荷载迅速下降。2 个试件的承载能力相似, 但 ISCW-1 的轴向位移更大, 说明钢丝间距小时, 钢丝布置多, 钢丝网架混凝土夹芯墙有更好的延性。为避免结构发生脆性破坏, 建议钢丝间距不应大于 100 mm。

3) ISCW-5、ISCW-1 及 ISCW-6 试件的混凝土强度等级分别为 C20、C30 及 C40, 混凝土层厚度和钢丝间距相同。随着混凝土强度等级由 C20 增大至 C40, 试件的峰值荷载分别提高了 36% 和 32%。加载初期, 3 个试件的荷载-位移曲线呈线性变化, 继续加载, 荷载-位移曲线的曲率减小, 试件进入塑性阶段, 产生裂缝, 达到峰值荷载时, 试件 ISCW-6 突然破坏, 而 ISCW-5 和 ISCW-1 达到峰值荷载后强度下降较缓, 表明混凝土强度等级越高, 承载力越大, 但达到峰值荷载后强度下降迅速, 这可能是由于混凝土的等级越高, 钢丝无法有效约束所致。因此在实际工程应用中建议混凝土强度等级不应小于 C30, 且随着混凝土强度增高, 可适当降低钢丝间距。

### 3.2 轴向刚度

由图 5 可以看出, 试件刚度随着混凝土层厚度、混凝土强度的增大而增大, 而随着钢丝间距增大而减小, 这是因为钢丝间距越小, 钢丝布置越多, 对混凝土的约束能力越强, 混凝土裂缝发展较为缓慢, 试件在达到极限承载力时竖向位移较小, 因此刚度较大。

为了进一步评估试件轴向刚度的影响因素, 引入正割刚度评价试件的刚度变化, 见式(2):

$$K_{0.3F_p} = \frac{0.8F_p - 0.3F_p}{\Delta_{0.8F_p} - \Delta_{0.3F_p}} \quad (2)$$

式中:  $F_p$  为峰值荷载;  $\Delta_{0.8F_p}$  为 80% 峰值荷载对应的轴向位移;  $\Delta_{0.3F_p}$  为 30% 峰值荷载对应的轴向位移。

正割刚度的计算值列于表 3 中, 可以看出: 混凝土板较厚的试件 ISCW-3、ISCW-1 的正割刚度大于混凝土板厚较小的 ISCW-2; 钢丝间距较小的试件 ISCW-1 的正割刚度大于钢丝间距较大的试件 ISCW-4; 而混凝土强度等级较高的试件 ISCW-6 的正割刚度略高于混凝土强度等级较低的试件 ISCW-5 和 ISCW-1。

表3 刚度计算的相对值

Table 3 Relative values of stiffness calculation

| 试件编号   | $K_{0.3F_p} /$<br>( $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ ) | $0.3F_p /$<br>kN | $\Delta_{0.3F_p} /$<br>mm | $0.8F_p /$<br>kN | $\Delta_{0.8F_p} /$<br>mm | $F_p /$<br>kN |
|--------|--------------------------------------------------------|------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|---------------|
| ISCW-1 | 924(1.00)                                              | 294              | 0.29                      | 784              | 0.82                      | 980           |
| ISCW-2 | 857(0.92)                                              | 216              | 0.25                      | 576              | 0.67                      | 721           |
| ISCW-3 | 1530(1.65)                                             | 331              | 0.35                      | 882              | 0.71                      | 1103          |
| ISCW-4 | 689(0.75)                                              | 306              | 0.17                      | 816              | 0.91                      | 1020          |
| ISCW-5 | 947(1.02)                                              | 216              | 0.49                      | 576              | 0.87                      | 720           |
| ISCW-6 | 1178(1.27)                                             | 388              | 0.33                      | 1036             | 0.88                      | 1295          |

括号内数字为以试件 ISCW-1 为基准, 各试件  $K_{0.3F_p}$  的相对值。

## 4 结 论

为了研究 ISCW 在轴压作用下的力学性能, 对 6 个足尺试件进行了轴压试验研究, 得到以下主要结论。

1) 6 个轴心受压试件破坏模式均表现为: 试件中部或下部产生裂缝, 裂缝向下发展, 试件劈裂, 端部混凝土破坏, 试件迅速失效, 呈脆性破坏特性。

2) 试件轴压状态下的峰值荷载随混凝土强度、混凝土层厚度的增大而增大, 随钢丝间距的增大无明显变化。表现为当混凝土强度由 C20 增大到 C40 时, 峰值荷载分别提升 36% 和 32%; 当混凝土层厚

度由 65 mm 增大至 85 mm 时,峰值荷载分别提升 35% 和 12%。

3)试件轴压状态下的轴向刚度随混凝土强度、混凝土层厚度的增大而增大,随钢丝间距的增大而减小。表现为当混凝土强度由 C30 增大到 C40 时,轴向刚度提升 27%;当混凝土层厚度由 65 mm 增大至 85 mm 时,轴向刚度分别提升 8% 和 65%;当钢丝间距由 50 mm 增大到 100 mm 时,轴向刚度降低 25%,表明钢丝间距越小,钢丝网架混凝土夹芯墙有更好的延性。

4)在实际工程应用中,建议钢丝间距不大于 100 mm,混凝土强度等级不低于 C30、厚度不小于 150 mm,避免在受压过程中结构因荷载、变形过大发生破坏。

#### 参 考 文 献

- [1] ALCHAAR A, ABED F. Finite element analysis of a thin-shell concrete sandwich panel under eccentric loading[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 32, 101804.
- [2] BENAYOUNE A, SAMAD A A A, TRIKHA D N. Structural behaviour of eccentrically loaded precast sandwich panels[J]. *Construction & Building Materials*, 2006, 20(9):713-724.
- [3] KUMAR S, CHEN B Q, XU Y Y, et al. Structural behavior of FRP grid reinforced geopolymer concrete sandwich wall panels subjected to concentric axial loading[J]. *Composite Structures*, 2021, 270, 114117.
- [4] MUGAHED A Y H, ABANG A A A, RAIZAL S M R, et al. Structural behavior of axially loaded precast foamed concrete sandwich panels[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 107:307-320.
- [5] BOURNAS D A, TORRISI G, CRISAFULLI F, et al. Experimental investigation and analytical modeling of prefabricated reinforced concrete sandwich panels[C]//Proc. of 15th World Confer-

ence on Earthquake Engineering. Lisbon: 2012.

- [6] APPA R G, POLURAJU P. Cyclic behaviour of precast reinforced concrete sandwich slender walls[J]. *Structures*, 2020, 28:80-92.
- [7] SANDIP D, ANJAN K B. Seismic performance of composite plate shear walls[J]. *Structures*, 2016(6):59-72.
- [8] 钱稼茹,张小玲,冯葆纯,等. 带现浇端柱的预制夹芯混凝土墙板抗震性能试验[J]. *建筑结构学报*, 2011, 41(2):22-25
- [9] LU Z, WANG Y, LI J B, et al. Experimental study on seismic performance of L-shaped insulated concrete sandwich shear wall with a horizontal seam[J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2019, 28(1), e1551.
- [10] RICCI I, PALERMO M, GASPARINI G, et al. Results of pseudo-static tests with cyclic horizontal load on cast in situ sandwich squat concrete walls[J]. *Engineering Structures*, 2013, 54: 131-149.
- [11] QIAO W T, YIN X X, ZHAO S Y, et al. Cyclic loading test study on a new cast-in-situ insulated sandwich concrete wall[J]. *PloS One*, 2019, 14(11), e0225055.
- [12] QIAO W T, YIN X X, ZHANG H Y, et al. Experimental study of insulated sandwich concrete wall connections under cyclic loading[J]. *Structures*, 2020, 28:2000-2012.
- [13] QIAO W T, YUAN J W, WANG D, et al. Pseudo-static experimental study on insulated sandwich concrete wall with embedded columns[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 34, 101926.
- [14] QIAO W T, KANG J L, WANG D, et al. Shaking table test on insulated sandwich concrete wall building structure[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 37, 102165.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.
- [16] 全国钢标准化技术委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021.