

# 预制混凝土钢丝网架夹心墙板抗震性能 有限元分析

陈昕<sup>1,2</sup>, 尤川<sup>1</sup>, 宋雨阁<sup>3</sup>, 王余<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省现代建筑产业专业技术创新中心, 辽宁 沈阳 110168; 3. 中国建筑第二工程局有限公司北方分公司, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 通过预制混凝土钢丝网架夹心墙板拟静力试验, 探究不同试验参数对夹心墙板抗震性能的影响。方法 采用有限元分析软件 ABAQUS 对预制混凝土钢丝网架夹心墙板的抗震性能进行数值模拟分析; 选用已有的钢筋-混凝土本构关系, 以钢丝直径、钢丝强度和混凝土强度作为试验变量, 研究其在低周往复荷载作用下的破坏状态、极限承载力、刚度退化以及耗能能力。结果 钢丝直径从 3.5 mm 增加至 5 mm 时, 试件的极限承载力提高了 1.77%, 试件的等效黏滞阻尼系数均为 0.23; 钢丝强度从 300 MPa 增加至 500 MPa 时, 试件的极限承载力提高了 7.7%, 位移延性系数提高了 15.3%; 混凝土强度由 C30 提高到 C45 时, 试件的极限承载力提高了 20%, 位移延性系数降低了 35%, 耗能能力提高了 43.8%。结论 增大钢丝直径, 试件的极限承载力和延性系数无明显变化; 提高钢丝强度能够提高墙板的极限承载力和延性; 增大混凝土强度等级可提高墙板承载力, 但会降低试件的延性。

**关键词** 夹心墙板; 钢丝网架; 抗震性能; 有限元分析

中图分类号 TU375

文献标志码 A

## Finite Element Analysis of Seismic Performance for Precast Concrete Sandwich Wall Panel of Wire-mesh Frame

CHEN Xin<sup>1,2</sup>, YOU Chuan<sup>1</sup>, SONG Yuge<sup>3</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Technology Innovation Center of Modern Construction Industry in Liaoning Province, Shenyang, China, 110168; 3. China Construction Second Engineering Bureau Ltd. Northern Branch, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** Through the pseudo-static test of the precast concrete sandwich wall panel of wire-mesh frame, the influence of different test parameters on the seismic performance of the sandwich wall

收稿日期: 2022-09-27

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1100402-01)

作者简介: 陈昕(1982—), 女, 副教授, 博士, 主要从事装配式混凝土结构等方面研究。

panel was investigated. The finite element analysis software ABAQUS was used to analyze the seismic performance of the precast concrete sandwich wall panel of wire-mesh frame. The existing steel-concrete constitutive relation was selected, using steel wire diameter, steel wire strength, and concrete strength as experimental variables, the failure state, ultimate bearing capacity, stiffness degradation, and energy dissipation capacity of the sandwich wall panel under low cycle loading were studied. When the steel wire diameter increased from 3.5 mm to 5 mm, the ultimate capacity of the specimen increased by 1.77%, and the viscous resistance coefficient of the specimen was 0.23; When the strength of the steel wire increased from 300 MPa to 500 MPa, the ultimate capacity of the specimen increased by 7.7% and the displacement ductility coefficient increased by 15.3%; When the concrete strength increased from C30 to C45, the ultimate capacity of the specimen increased by 20%, and the displacement ductility coefficient decreased by 35%, thus the energy dissipation capacity increased by 43.8%. Increasing the diameter of the steel wire has not any effect on the specimen's ultimate capacity and ductility coefficient. Increasing the steel wire's strength can improve the specimen's ultimate capacity and ductility. The ultimate capacity of wall panel could be improved by increasing the concrete strength, but ductility performance was reduced.

**Key words:** sandwich wall panel; wire-mesh frame; seismic performance; finite element analysis

“十三五”期间,严寒寒冷地区城镇新建居住建筑节能达到75%<sup>[1]</sup>,“十四五”规划对装配式建筑的快速发展及建筑节能提出了更高的要求,预制混凝土夹心墙板则成为装配式建筑的重要节能构件。预制混凝土夹心墙板主要由内外叶墙板、保温板、连接件等组成,是一种集保温、隔热等优点于一体的承重构件。

国内外学者对预制混凝土夹心墙板的受力性能和热工性能进行了大量研究,并取得了显著的研究成果。薛伟辰等<sup>[2-4]</sup>对夹心墙板进行了拟静力试验和FRP连接件的拉拔性能试验,分析了墙板承载力、位移延性、耗能能力及连接件的力学性能,研究表明,夹心墙板与FRP连接件的承载力具有较大的安全储备。江焕芝<sup>[5]</sup>研发了一种新型钢-纤维复合连接件,并在试验中证明钢-纤维复合连接件能够实现内外叶墙板之间的有效连接。郑贤贤、王博<sup>[6-7]</sup>利用ABAQUS有限元软件对夹心墙板进行拟静力试验,结果表明,预制混凝土夹心墙板在刚度退化、承载能力和抗震性能与现浇墙板相当。Y. H. M. Amran等<sup>[8]</sup>进行了夹心保温墙板拟静力试验,结果表明,预制混凝土夹心墙板的开裂模式与传统钢筋混凝土墙相似,金属波浪形连接件能

够让内外叶墙板之间具有较好的协同作用。A. Chen等<sup>[9]</sup>对带FRP板式连接件加心墙板进行抗弯承载力分析,发现FRP板式连接件能够较好传递内外叶墙板之间的剪力,夹心墙板表现出良好的组合性能。M. Elkashef等<sup>[10]</sup>采用加气泡泡沫混凝土代替传统泡沫材料来提高夹心板的承载能力。王余<sup>[11]</sup>在对《装配式混凝土钢丝网架板式建筑技术规程》(T/CECS 852—2021)<sup>[12]</sup>钢丝网架夹心保温墙连接模式及结构设计方法的基础上,提出了钢丝网架夹心保温外墙仅内叶墙与楼板连接的方法,并通过试验研究得到有限元分析的内外叶墙板协同工作的承载力曲线,提出了不同厚度夹心保温层的PC3D墙受压承载力计算公式,但对于钢丝网架夹心保温墙板的抗震性能还有待进一步研究。

基于上述分析,笔者在课题组前期试验<sup>[11]</sup>基础上,利用ABAQUS有限元软件进行预制混凝土钢丝网架夹心墙板抗震性能研究,以钢丝直径、钢丝强度和混凝土强度作为试验变量,探究预制混凝土钢丝网架夹心墙板在低周往复荷载作用下的极限承载力、延性、刚度及耗能能力,并展开参数影响分析。研究表明:提高混凝土强度和钢丝强度能够

提高钢丝网架夹心墙板的极限承载力和延性,该试验研究成果能够为装配式建筑中预制混凝土钢丝网架夹心墙板的生产与工程应用提供参考依据。

## 1 数值模拟概况

### 1.1 模型设计

预制混凝土钢丝网架夹心墙板整体尺寸如图1所示。墙板内部钢丝网架是由两片钢

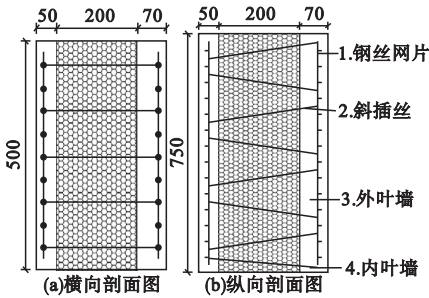


图1 墙体构造示意图

Fig. 1 The schematic diagram of wall construction

丝网片和斜插丝焊接而成,钢丝网片布置为 $\Phi 3.0 @ 50$  (mm),斜插丝为 $\Phi 3.5$  (mm),混凝土等级为C45,墙体构造示意图如图1所示。

笔者取文献[11]中三组对照试验(XQ-1~XQ-3)进行模型验证,并基于验证模型进行拟静力试验(下文模型验证部分以及对验证模型进行拟静力试验部分的有限元模型与文献[11]中所对应试件命名一致)。笔者共设计了12组(XQ3-0~XQ3-11)参数扩展试验。XQ-1:内叶墙受压,外叶墙悬空;XQ-2:内叶墙受压,外叶墙约束;XQ-3:内外叶墙共同受压。分别以钢丝直径、钢丝强度和混凝土强度作为试验变量,每组4个试件,试件详细参数见表1。

表1 试件参数

Table 1 Specimen parameters

试验名称	试件编号	受力方式	混凝土强度等级	斜插丝直径/mm	斜插丝强度/MPa
物理试验 <sup>[11]</sup>	XQ-1	内叶墙受压,外叶墙悬空	C45	3.5	335
	XQ-2	内叶墙受压,外叶墙约束	C45	3.5	335
	XQ-3	内外叶墙共同受压	C45	3.5	335
数值模拟	XQ3-0	内外叶墙共同受压	C45	3.5	335
	XQ3-1	内外叶墙共同受压	C45	4.0	335
	XQ3-2	内外叶墙共同受压	C45	4.5	335
	XQ3-3	内外叶墙共同受压	C45	5.0	335
	XQ3-4	内外叶墙共同受压	C45	4.0	300
	XQ3-5	内外叶墙共同受压	C45	4.0	335
	XQ3-6	内外叶墙共同受压	C45	4.0	400
	XQ3-7	内外叶墙共同受压	C45	4.0	500
	XQ3-8	内外叶墙共同受压	C30	4.0	335
	XQ3-9	内外叶墙共同受压	C35	4.0	335
	XQ3-10	内外叶墙共同受压	C40	4.0	335
XQ3-11	内外叶墙共同受压	C45	4.0	335	

### 1.2 材料本构模型

预制混凝土钢丝网架夹心墙由混凝土、

钢筋、聚苯乙烯泡沫等材料组成。本试验采用方自虎等<sup>[13]</sup>提出的钢筋-混凝土本构关系

模型。混凝土单轴应力-应变关系曲线如图2所示。其中,  $f_{c,r}$  和  $f_{t,r}$  分别为混凝土单轴抗压强度代表值和混凝土单轴抗拉强度代表值;  $\varepsilon_{t,r}$ 、 $\varepsilon_{c,r}$  和  $\varepsilon_{c,u}$  分别为混凝土单轴抗拉强度对应的混凝土峰值拉应变、混凝土单轴抗压强度对应的混凝土峰值压应变和应力曲线下降段应力等于  $0.5 f_{c,r}$  时对应的混凝土压应变。

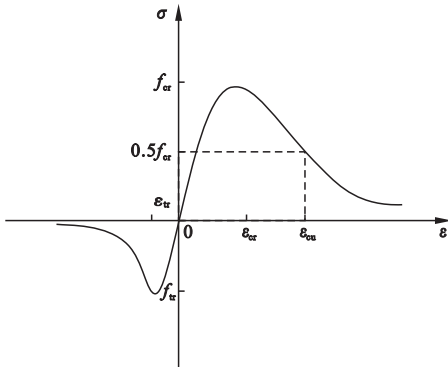


图2 混凝土单轴应力-应变曲线

Fig. 2 The uniaxial stress-strain curve of concrete

钢筋的应力-应变本构选取《混凝土结构

表2 混凝土塑性损伤模型参数

Table 2 The plastic damage model parameters of concrete

密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比	膨胀角/( $^\circ$ )	偏心率	$f_{t0}/f_{c0}$	$K$	黏性参数
2 410	33 500	0.2	30	0.1	1.16	0.667	0.000 5

注:  $f_{t0}/f_{c0}$  为混凝土双轴极限抗压强度与单轴极限抗压强度比值;  $K$  为拉伸子午线面上与压缩子午线面上第二应力不变量之比。

### 1.3 单元选取及网格划分

在 ABAQUS 有限元模拟中,材料单元的选择需要根据材料属性及其作用性质进行选择。混凝土内外叶墙以及保温板采用 C3D8R 实体八节点缩减积分单元,钢筋选用 T3D2 两节点三维桁架 Truss 单元。

Mesh 模块中对模型进行网格划分,构件在进行网格划分时,根据计算结果的精度、构件的复杂程度和构件之间的相互作用方式来进行布种。试验模型尺寸较小,在进行网格布种时,钢筋布种间隔为 20 mm,保温板布种间隔为 50 mm,混凝土内外叶墙布种间隔为 30 mm。底部支座布种间隔为 50 mm,网格

设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[14]</sup>中的双折线模型,计算简图如图3所示。其中,  $E_s$  为弹性模量;  $f_y$  和  $f_{s,u}$  分别为钢筋的屈服强度和极限强度;  $\varepsilon_y$  和  $\varepsilon_{s,u}$  分别为钢筋的屈服应变和极限应变。保温板本构按照《钢丝网架混凝土复合板结构技术规程》(JGJ/T273—2012)<sup>[15]</sup>中规定取值。有限元分析时,混凝土弹性段取至  $0.4 E_c$ ,  $\varepsilon_0$  采用欧洲规范(EN 1992-1-1:2004)规定的数值 0.002。混凝土塑性损伤参数见表2。

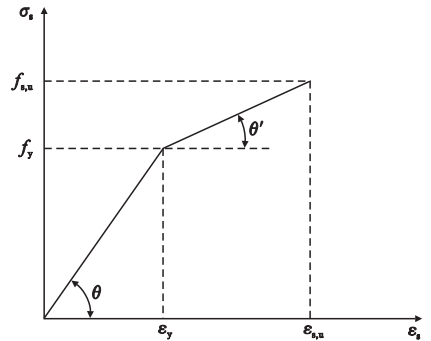
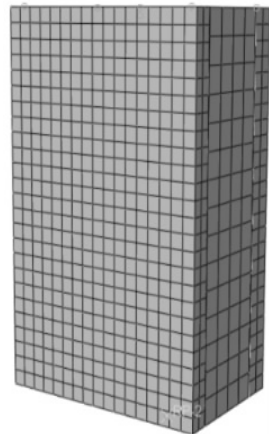


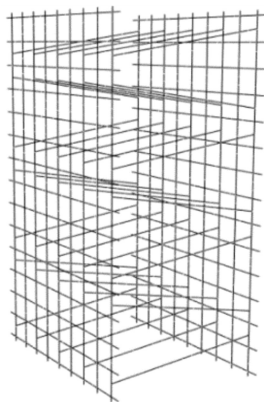
图3 钢筋应力-应变曲线

Fig. 3 The stress-strain curve of steel bars

划分结果如图4所示。



(a)墙板试件



(b) 钢丝网架

图4 墙体单元网格划分示意图

Fig. 4 The meshing of wall

#### 1.4 边界条件及加载制度

笔者采用方自虎<sup>[13]</sup>提出的混凝土-钢筋本构模型,对试件进行了竖向荷载作用下夹心墙板的受压有限元模拟。图5是试件 XQ-3 的试验结果<sup>[11]</sup>,图6是笔者基于试件 XQ-3 的试验基础上建立的有限元模型结果。表3

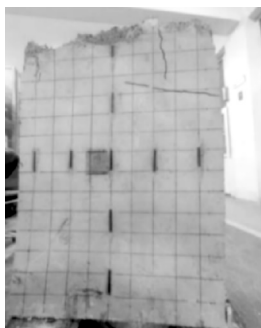


图5 XQ-3 外叶墙破坏

Fig. 5 The failure state of XQ-3 outer wall

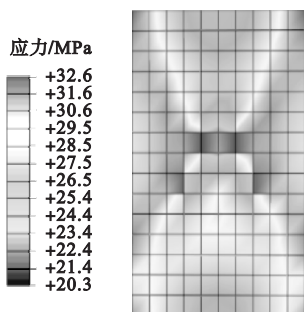


图6 XQ-3 外叶墙应力云图

Fig. 6 The stress cloud diagram of XQ-3 outer wall

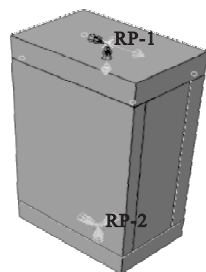
列举了物理试验<sup>[11]</sup>和笔者的数值模拟结果。经对比可得,笔者的数值模拟结果与物理试验<sup>[11]</sup>值误差小于10%,说明笔者采用的数值模拟模型与物理试验拟合较好,可以进行夹心墙板拟静力试验的数值模拟。

表3 物理试验与数值模拟结果对比

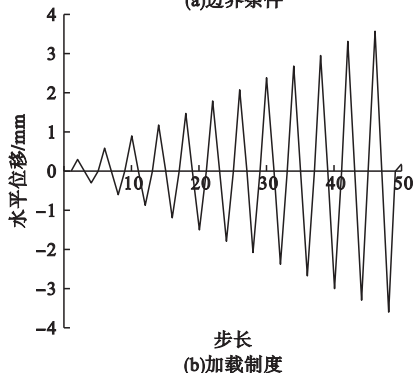
Table 3 The comparison of test and numerical simulation results

试件编号	极限荷载/kN		误差/%
	物理试验 <sup>[11]</sup>	数值模拟	
XQ-1	959.3	1 011.0	5.39
XQ-2	1 000.3	967.0	3.33
XQ-3	1 446.0	1 500.0	3.73

在抗震数值模拟中采用如下接触和边界条件:钢丝网架内嵌于模型内部,内外叶墙板与夹心板、底部支座与模型之间定义绑定接触,下分配梁表面与参考点 RP2 耦合并进行固定约束,上分配梁顶部与参考点 RP1 耦合如图7(a)所示,在试件顶部竖向施加恒载和侧面水平方向施加平面内的低周往复荷载,加载制度如图7(b)所示。



(a) 边界条件



(b) 加载制度

图7 有限元模型的边界条件与加载制度

Fig. 7 The boundary conditions and loading systems of FEM models

## 2 拟静力试验结果分析

### 2.1 滞回曲线

滞回曲线是结构在反复作用下的荷载-位移曲线,是评价结构在受力过程中的变形能力、刚度退化及耗能能力的依据。从数值模拟中得到的墙板在水平往复荷载作用下的滞回曲线如图8所示。由图可知,试件 XQ-3 的滞回曲线较为饱满,相比之下,试件 XQ-1 和试件 XQ-2 的滞回曲线则表现出更多的捏缩行为。

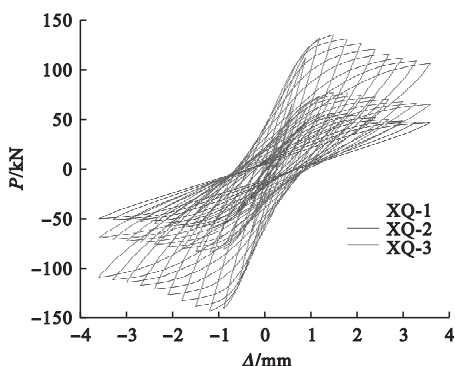


图8 滞回曲线

Fig. 8 The hysteresis curves

混凝土和钢丝网架的应力云图如图9、图10所示。由图可知,试件内叶墙的应力大于外叶墙,且内叶墙中心位置处的应力最大,这是因为内叶墙的厚度大于外叶墙,相同位移荷载作用下,内叶墙所承担的应力要远大于外叶墙。图10钢丝网架的应力云图与图9表现一致,说明内嵌式接触能够保证内外叶墙板与钢丝网架之间良好的协同作用。

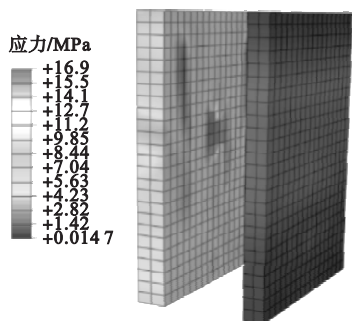


图9 混凝土应力云图

Fig. 9 The stress cloud map of concrete

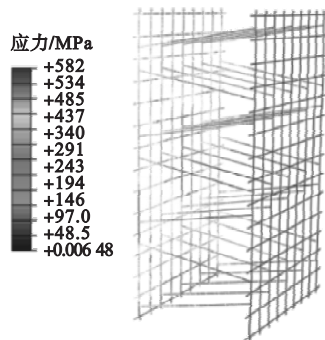


图10 钢丝网架应力云图

Fig. 10 The stress cloud map of wire-mesh frame

### 2.2 骨架曲线

延性是反应结构破坏前的塑性变形能力,是评价结构抗震性能好坏的重要性指标,通常用位移延性系数 $\mu$ 来表示。试验所用的试件并非理想的弹塑性体,可以通过能量等效法确定骨架曲线的屈服位移。能量等效原理如图11所示,将图中1处面积与2处面积等同后得到一个梯形,利用梯形面积得到屈服位移 $\Delta_y$ 。 $F_y$ 为屈服荷载, $\Delta_y$ 为屈服位移,对应屈服位移的荷载即为屈服荷载见表4。

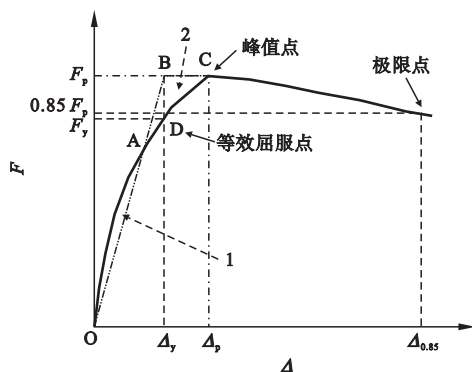


图11 能量等效原理

Fig. 11 The principle of energy equivalence

表4 承载力指标和位移延性系数

Table 4 The load-bearing capacity indicators and displacement ductility coefficients

试件编号	$F/kN$	$\Delta/mm$	极限荷载 $P/kN$	极限位移 $\Delta/mm$	位移延性系数
XQ-1	55.64	1.11	59.43	3.31	2.99
XQ-2	75.68	1.19	80.24	3.63	3.04
XQ-3	132.33	1.15	138.93	2.79	2.42

试件的骨架曲线如图 12 所示。由图可知,试件 XQ-3 的极限承载力、初始刚度均大于试件 XQ-1 和试件 XQ-2 的对应值,这是由于试件 XQ-3 采用内外叶墙共同加载的方式,加强了内外叶墙板之间的协同性并增大了试件的受力面积。表 4 中试件 XQ-2 的屈服荷载比试件 XQ-1 提高 36.02%,试件 XQ-3 的屈服荷载比试件 XQ-2 提高 74.85%。相比于屈服荷载,试件 XQ-3 的极限位移最小,延性系数为 2.42。说明试件 XQ-3 的刚度大,整体性好。试件 XQ-2 极限位移最大,延性系数为 3.04,具有较好的延性。

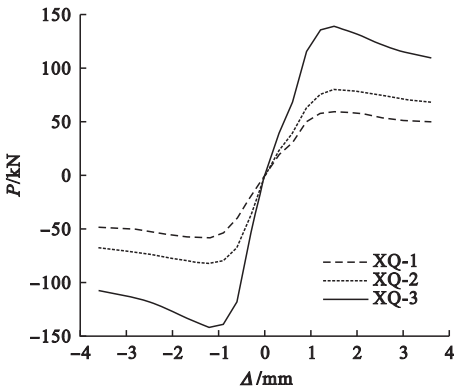


图 12 骨架曲线

Fig. 12 The skeleton curves

### 2.3 刚度退化

试件刚度根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)<sup>[16]</sup>中对结构构件的规定,采用割线刚度公式(1)计算,结果如图 13 所示。

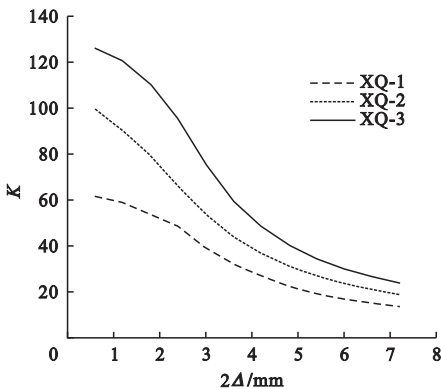


图 13 刚度曲线

Fig. 13 The stiffness curves

$$K_i = \frac{|+P_i| + |-P_i|}{|+\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (1)$$

式中: $P_i$ 为某次循环荷载峰值; $\Delta_i$ 为某次峰值荷载对应的位移。

与刚度退化具有同样效应的强度退化也能反映出试件的承载力和变形能力变化。根据规范按照式(2)计算强度退化系数,结果如图 14 所示。

$$\lambda_i = F_j^i / F_j^{i-1} \quad (2)$$

式中: $F_j^i$ 为第  $j$  级加载时,第  $i$  次循环的峰值荷载; $F_j^{i-1}$ 为第  $j$  级加载时,第  $i-1$  次循环的峰值荷载。

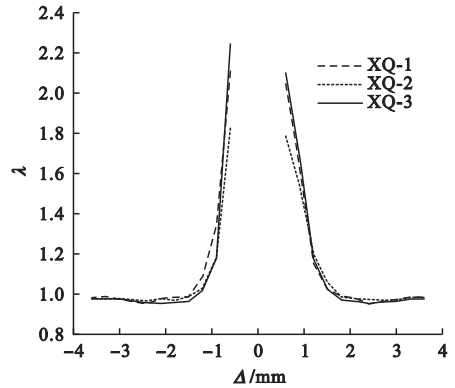


图 14 强度退化

Fig. 14 The strength degradation

由图 13 和图 14 可以看出,试件的刚度在初始加载时最大,当试件发生开裂此时刚度急剧下降,随着荷载的增大刚度下降趋于平缓。试件 XQ-3 的刚度最大,试件 XQ-2 和试件 XQ-1 依次减小,表明试件 XQ-3 的整体性能好,钢丝网架能够保证内外叶墙之间具有良好的协同作用。

### 2.4 耗能能力

根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T101—2015)<sup>[16]</sup>采用荷载-变形滞回曲线所包围的面积(见图 15)来评估试件的耗能能力。采用耗能系数  $E$  或者等效黏滞阻尼系数  $\zeta_{eq}$  表示,依据式(3)和式(4)计算,黏滞阻尼系数计算结果见表 6。

$$E = \frac{S_{(ABC+CDA)}}{S_{(CBE+ODF)}} \quad (3)$$

$$\zeta_{eq} = E / (2\pi). \quad (4)$$

式中:  $S_{(ABC+CDA)}$  为图 15 中滞回曲线所围成的面积;  $S_{(CBE+ODF)}$  为图 15 中  $\triangle CBE$  和  $\triangle ODF$  面积之和。

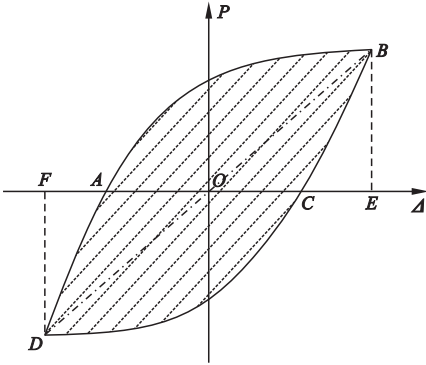


图 15 系数计算示意图

Fig. 15 The diagram of coefficient calculation

表 5 试件耗能指标

Table 5 The energy consumption indicators for test pieces

试件编号	耗能/J	$\zeta_{eq}$
XQ-1	782.023 2	2.02
XQ-2	1 448.045 9	2.56
XQ-3	2 488.983 14	2.60

从表 5 中按照第一圈滞回环计算得到的等效黏滞阻尼系数来看,试件 XQ-3 和试件

XQ-2 的等效黏滞阻尼系数大致相同,说明这两种夹心墙板在抵御地震的表现上相似。试件 XQ-1 的等效黏滞阻尼系数最小,比试件 XQ-2 的等效黏滞阻尼系数低 27%,比试件 XQ-3 的等效黏滞阻尼系数低 29%,说明试件 XQ-1 抵御地震作用的能力最差。这是因为试件 XQ-1 与试件 XQ-2 及试件 XQ-3 相比,只有内叶墙承担水平荷载,受力面积小,所以,在相同位移荷载作用下吸收的能量少。从积分面积上看,试件 XQ-3 的能量是试件 XQ-1 的能量的 3.2 倍,试件 XQ-2 的能量是试件 XQ-1 的能量的 1.85 倍,试件 XQ-3 及试件 XQ-2 能够吸收更多的地震能量。

### 3 参数扩展分析

为了探究预制混凝土钢丝网架夹心墙板抗震影响因素,笔者以试件 XQ-3 为研究对象。试件 XQ-3 是夹心墙板的内外叶墙板通过圈梁连接来承受竖向荷载和面内水平荷载,与现阶段预制构件中承重墙边界约束最为接近。笔者以斜插丝强度、钢筋直径、混凝土强度作为试验变量,探究试验变量对预制混凝土钢丝网架夹心墙板抗震性能的影响,结果如图 16 所示。

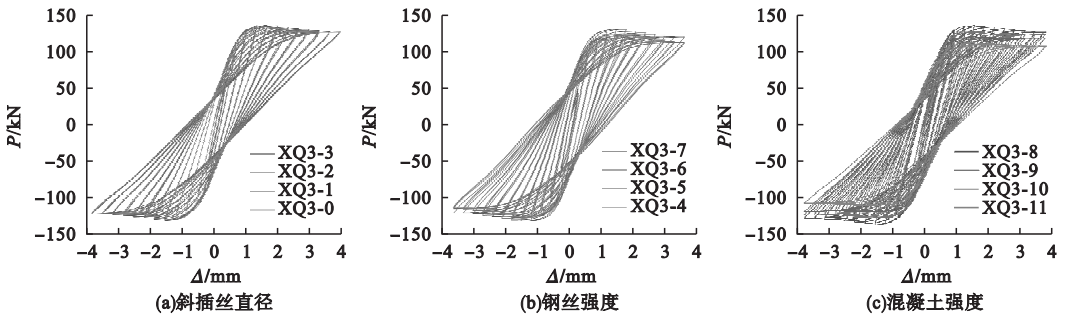


图 16 试件滞回曲线

Fig. 16 The hysteresis curves of specimens

由图 16 可知,各试件的滞回曲线表现较为饱满,试件的滞回环在承载力达到峰值荷载前呈梭形,达到峰值荷载后表现出一定的捏缩现象,但试件在地震时具有较好的吸收地震能量的能力。图 16(a) 中,由于夹心墙板中的斜插丝沿墙板高度等间距布置,通过

数值模拟结果来看,钢丝直径增加对其抵抗水平往复荷载的能力贡献不大。图 16(b) 中显示,钢丝网架上的钢丝强度从 300 MPa 增加至 500 MPa(试件 XQ3-4 ~ XQ3-7) 时,试件滞回曲线变化不明显。这是因为钢筋上的荷载是由钢筋与混凝土之间的粘结作用传递



的,当试件在荷载作用下发生一定量的变形时,钢筋与混凝土之间会产生裂缝导致粘结作用降低,无法完全发挥钢丝的作用。因此,钢丝强度并不会对试件的物理力学性能产生较大影响,在实际工程应用中的钢筋应按照相关规范进行选取。图 16(c)中,混凝土强度由 C30 增加至 C45 (试件 XQ3-8 ~ XQ3-11)时,试件滞回曲线在极限承载力、刚度等力学指标上有显著提高,其中试件 XQ3-11 的滞回曲线面积最大,说明耗散地震能量的能力最强。综上,混凝土强度对试件的抗震性能影响较大,钢筋直径和强度对墙体的抗震性能未产生明显影响。极限承载力、位移延性系数及等效黏滞阻尼系数结果如表 6 所示。

表 6 极限承载力与位移延性系数

Table 6 The ultimate capacities and displacement ductility coefficients

试件编号	极限承载力/kN	位移延性系数	等效黏滞阻尼系数
XQ3-0	129.658	4.46	0.23
XQ3-1	130.193	4.21	0.23
XQ3-2	130.926	4.71	0.23
XQ3-3	131.955	4.31	0.23
XQ3-4	123.326	2.75	0.26
XQ3-5	125.268	3.07	0.28
XQ3-6	126.197	3.15	0.26
XQ3-7	132.854	3.17	0.20
XQ3-8	109.968	6.63	0.16
XQ3-9	118.519	5.70	0.16
XQ3-10	124.704	5.37	0.16
XQ3-11	131.955	4.31	0.23

由表 6 可知,斜插丝直径由 3.5 mm 增至 5 mm,各试件的极限承载力增长 1.77%。等效黏滞阻尼系数为 0.23,说明通过增大斜插丝直径未能对墙板的承载力和延性产生明显的影响。钢丝强度从 300 MPa 增加至 500 MPa 时,试件的极限承载力提高了 7.7%,位移延性系数提高了 15.3%,等效黏

滞阻尼系数有降低趋势,说明通过提高钢丝强度可以提高试件的极限承载力和位移延性。试件 XQ3-8 ~ 试件 XQ3-11 的混凝土强度由 C30 增加至 C45,试件的极限承载力提高了 20%,位移延性系数降低了 35%,等效黏滞阻尼系数提高了 43.8%,说明增大混凝土强度等级能够提高墙板的极限承载力和等效黏滞阻尼系数,但也会使其延性有所降低。

## 4 结 论

(1) 试件 XQ-3 的滞回曲线最为饱满,初始刚度和极限承载力均大于试件 XQ-1 和试件 XQ-2 的对应值;采用内外叶墙板共同受力的方式能够提高墙板的整体性,表现出良好的抗震能力。

(2) 斜插丝直径由 3.5 mm 增至 5 mm 时,墙板试件极限承载力和变形能力未见明显影响。

(3) 钢丝强度由 300 MPa 增至 500 MPa,可以大幅度提高试件的延性,提高幅度达 15.3%,且试件极限承载力也有所增加。

(4) 采用高强度混凝土能够有效提高试件的极限承载力,但试件的延性也会大幅度降低,因此,建议在实际工程应用时内外叶墙可选用 C20 ~ C35 之间的细石混凝土。

(5) 对于预制混凝土钢丝网架夹心墙板在平面外低周往复荷载作用下的力学性能及破坏模式,以及影响钢丝网架夹心墙板组合性能的因素等方面还需要进一步研究。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划[J]. 安装,2022,362(5):1-6.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Building energy saving and green building development planning in the "14th five-year plan" [J]. Installation, 2022, 362 (5):1-6.)
- [2] 薛伟辰,姜伟庆,宋佳峥,等. 预制混凝土夹心保温外挂墙体桁架式不锈钢连接件抗拔与抗剪性能试验研究[J]. 施工技术,2018,47(12):95-99.

- (XUE Weichen, JIANG Weiqing, SONG Jiazheng, et al. Experimental research on pull-out and shearing capacity of stainless steel truss connectors in precast concrete sandwich insulation facade wall panels [J]. Construction technology, 2018, 47(12): 95 - 99.)
- [3] 薛伟辰, 杨佳林, 董年才, 等. 低周反复荷载下预制混凝土夹心保温剪力墙的试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(5): 1104 - 1110.  
(XUE Weichen, YANG Jialin, DONG Niancai, et al. Experimental study on precast concrete sandwich insulation shear walls under low reversed cyclic loading [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2013, 43(5): 1104 - 1110.)
- [4] 薛伟辰, 杨佳林, 王君若. 预制夹芯保温墙体FRP连接件抗拔性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(4): 55 - 59.  
(XUE Weichen, YANG Jialin, WANG Junruo. Pull-out test for evaluations of anti-pulling behavior of FRP connectors in precast sandwich insulation wall panels [J]. Composites science and engineering, 2012(4): 55 - 59.)
- [5] 江焕芝. 基于钢-纤维复合连接件的预制混凝土夹心保温墙板性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.  
(JIANG Huanzhi. Research on behavior of precast concrete sandwich panels with steel-GFRP composite connectors [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.)
- [6] 郑贤贤. 装配式钢丝网架混凝土结构抗震性能研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.  
(ZHENG Xianxian. Study on seismic performance of prefabricated concrete structure with steel wire truss [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020.)
- [7] 王博. 现浇密柱钢丝网架聚苯夹心混凝土承重墙板式住宅结构体系抗震性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.  
(WANG Bo. Analysis study on seismic behavior of the structure made by pre-cast sandwich concrete wall panel with cast-in-site end columns [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.)
- [8] AMRAN Y H M, RASHID R S M, HEJAZI F, et al. Response of precast foamed concrete sandwich panels to flexural loading [J]. Journal of building engineering, 2016, 7: 143 - 158.
- [9] CHEN A, NORRIS T G, HOPKINS P M, et al. Experimental investigation and finite element analysis of flexural behavior of insulated concrete sandwich panels with FRP plate shear connectors [J]. Engineering structures, 2015, 98: 95 - 108.
- [10] ELKASHEF M, ABDELMOOTY M. Investigating the use of autoclaved aerated concrete as an infill in reinforced concrete sandwich panels [J]. Materials and structures, 2015(48): 2133 - 2146.
- [11] 王余. 装配式混凝土钢丝网架夹心保温墙承载力研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2021.  
(WANG Yu. Study on bearing capacity of assembled concrete steel wire mesh sandwich insulation wall [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2021.)
- [12] 沈阳建大工程检测咨询有限公司, 嘉和住工(沈阳)预制构件制造有限公司. 装配式混凝土钢丝网架板式建筑技术规程: T/CECS 852—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.  
(Shenyang Jianda Engineering Testing Consulting Co. Ltd., Jiahe Residential (Shenyang) Prefabricated Parts Manufacturing Co. Ltd. Technical specification for assembled buildings with precast wire grids concrete slab: T/CECS 852—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.)
- [13] 方自虎, 周海俊, 赖少颖, 等. ABAQUS混凝土应力-应变关系选择[J]. 建筑结构, 2013, 43(增刊2): 559 - 564.  
(FANG Zihu, ZHOU Haijun, LAI Shaoying, et al. Choose of ABAQUS concrete stress-strain curve [J]. Building structure, 2013, 43(S2): 559 - 564.)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [15] 华声(天津)国际企业有限公司, 天津建筑设计院. 钢丝网架混凝土复合板结构技术规程: JGJ/T 273—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
(Huasheng (Tianjin) International Enterprise Co. Ltd, Tianjin Architecture Design Institute Co. Ltd. Technical specification for wire grids concrete composite slab structure: JGJ/T 273—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.)
- [16] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震试验规程: JGJ/T101—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
(China Academy of Building Research. Specification for seismic test of buildings: JGJ/T101—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)