

文章编号:1674-2974(2016)01-0068-08

# HPFL 加固预制空心板的数值模拟与试验研究\*

尚守平<sup>†</sup>, 王 智

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**对 HPFL 加固预制混凝土空心板抗弯性能和抗剪性能进行了试验研究, 以此为基础利用 ANSYS 有限元计算软件对 HPFL 加固预制空心板进行了数值模拟. 与试验结果进行比较分析, 研究加固构件的抗弯性能和抗剪性能. 通过有限元建模进一步研究了 HPFL 加固层砂浆强度、HPFL 加固层钢筋网尺寸、HPFL 加固条带宽度和预制空心板板体拼装方向等因素对 HPFL 加固预制空心板抗剪性能的影响. 结果表明, 有限元计算结果与试验结果基本一致, 用 HPFL 加固预制空心板是一种提高预制空心板抗弯性能和抗剪性能的有效加固方法. HPFL 加固层砂浆强度和 HPFL 加固条带宽度对预制空心板抗剪性能影响最大, 随着 HPFL 加固层砂浆强度提高和 HPFL 加固条带宽度增大, 预制空心板抗剪极限承载力显著提高; HPFL 加固层钢筋网尺寸对预制空心板抗剪性能影响不明显; HPFL 能同时提高预制空心板平面内横、竖两个方向的抗剪极限承载力.

**关键词:**预制空心板; 高性能复合砂浆钢筋网薄层; 加固; 抗弯性能; 抗剪性能

**中图分类号:** TU375.2

**文献标识码:** A

## Numerical Simulation and Experimental Investigation on Precast Hollow-core Slabs Strengthened with HPFL

SHANG Shou-ping<sup>†</sup>, WANG Zhi

(College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

**Abstract:** Based on the experimental study of the flexural performance and shear performance of precast hollow-core slabs strengthened with HPFL, the ANSYS was applied to build the spatial finite element model to analyze the precast hollow-core slabs strengthened with HPFL. Further analysis was conducted for the HPFL strengthening surface mortar strength, HPFL reinforcement layer steel bar mesh size, HPFL reinforcement stripe width and the direction of precast hollow slabs and other factors on the precast hollow slabs shear performance strengthened with HPFL. The results demonstrate that finite element analysis results and the experimental results are basically identical and the effectiveness of HPFL as a kind of improved precast hollow slabs flexural resistance and shear resistance. The HPFL stripe width and the strengthening surface mortar strength have the most important influence on the strengthening effects. The ultimate capacity increases with their enlargement. The ultimate capacity increases slightly with the steel bar mesh size. HPFL can also improve the precast hollow slabs' shear bearing capacity of horizontal and vertical directions.

\* 收稿日期: 2015-01-20

基金项目: 国家十二五科技支撑计划项目(2011BAJ08B02); 湖南省住建厅 2010 科技计划项目(201003)

作者简介: 尚守平(1953-), 男, 山东黄县人, 湖南大学教授, 博士生导师

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: sps@hnu.edu.cn

**Key words:** precast hollow-core slabs; high performance ferro-cement laminate (HPFL); strengthening; flexural performance; shear performance

预制空心板曾广泛应用在我国建筑物楼面结构中,但由于其整体性差、板侧拼缝易开裂以及平面内抗剪切能力薄弱,预制空心板的使用,尤其在地震区的使用受到了很大的限制.鉴于预制空心板具有造价低,自重轻,施工方便,机械化程度高等优点,如何重新推广预制空心板的使用,提高预制空心板的抗弯性能和抗剪性能是预制空心板加固面临的重要问题.

目前,已有学者提出用粘贴纤维增强复合材料、粘贴钢板和采用体外预应力等方法加固预制空心板提高其抗弯承载力<sup>[1-3]</sup>.本文提出一种新型预制空心板加固方法,即高性能复合砂浆钢筋网薄层(HPFL)加固预制空心板,以提高其抗弯性能和抗剪性能.高性能复合砂浆的主要成分是硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥和加固纤维,它具有高强度、低收缩和与混凝土表面粘结性能良好等优点. HPFL 由高性能水泥复合砂浆、剪切销钉和钢筋网等组成,采用 HPFL 加固能有效提高构件的承载力、刚度、抗裂性和延性,近年来已经成为混凝土结构和砌体结构加固的重要材料<sup>[4-5]</sup>.

随着大型商用有限元软件的广泛运用,数值模拟在加固领域中已经成为一种重要研究手段.本文所述的 HPFL 加固预制空心板抗弯性能和抗剪性能试验,由于试验条件和试件数量限制,只能分析较单一的加固影响因素.为全面研究 HPFL 加固预制空心板的抗弯性能和抗剪性能,利用 ANSYS 建立了三维有限元模型,通过模拟结果与试验结果的对比如研究,表明有限元分析的适用性和 HPFL 加固预制空心板的有效性.进一步研究了 HPFL 加固层砂浆强度、HPFL 加固层钢筋网尺寸、HPFL 加固条带宽度和预制空心板板体拼装方向等重要因素对抗剪性能的影响<sup>[6]</sup>,弥补试验不足.

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 单元模拟

本文通过预制空心板单元、HPFL 单元和接触单元建立 HPFL 加固预制空心板分离式有限元模

型,预制空心板单元采用 8 节点实体单元 SOLID65 模拟,板中分布钢筋通过添加实常数体现;HPFL 加固条带由高性能复合砂浆和剪切销钉钢筋网骨架两部分组成,用 8 节点实体单元 SOLID65 单元模拟复合砂浆条带,钢筋网骨架通过添加实常数体现;HPFL 加固面层与预制空心板之间的粘结滑移作用采用接触单元模拟,采用面一面接触单元 CONTA174 和 TARGE170,定义粘结滑移作用.

### 1.2 材料本构模型及选用参数

混凝土材料本构关系选用 GB50010-2010 中混凝土应力-应变曲线的上升段,下降段为水平直线,如式(1)和(2),通过多线性等向强化模型 MISO 模拟,破坏准则选用 William-Warnke 五参数破坏准则<sup>[7]</sup>.

$$\sigma_c/f_c = 1 - (1 - \epsilon_c/\epsilon_0)^n, \epsilon_c \leq \epsilon_0 \quad (1)$$

$$\sigma_c = f_c, (\epsilon_0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \quad (2)$$

式中:  $f_c$  为混凝土单轴抗压强度,  $\epsilon_0 = 0.002$ ,  $\epsilon_{cu} = 0.0033$ .

高性能复合砂浆材料本构关系选用式(3)和(4),通过多线性等向强化模型 MISO 模拟,破坏准则选用 William-Warnke 五参数破坏准则<sup>[8]</sup>.

$$\sigma/f_c = 2(\epsilon/\epsilon_0) - (\epsilon/\epsilon_0)^2, (0 \leq \epsilon/\epsilon_0 \leq 1) \quad (3)$$

$$\sigma/f_c = 1 - 0.15(\epsilon - \epsilon_0)/(\epsilon_{cu} - \epsilon_0), (\epsilon/\epsilon_0 \geq 1) \quad (4)$$

式中:  $f_c$  为复合砂浆单轴抗压强度,  $\epsilon_0 = 0.002$ ,  $\epsilon_{cu} = 0.0033$ .

### 1.3 接触单元

对于加固界面的模拟,已有学者对 FRP 与混凝土的界面粘结性能进行了研究<sup>[9]</sup>.但 HPFL 与预制空心板之间的界面性能鲜有研究.本文下述试验中,均没有出现加固条带在达到极限荷载前剥离脱落的现象,说明经过下述处理的试件,两者之间的黏结性能良好.本文建立的分离式有限元模型,界面单元选用面一面接触单元,应用“目标”面和“接触”面来形成接触对<sup>[10]</sup>.同时给目标单元和接触单元指定相同的实常数,定义预制空心板表面为目标面,HPFL 加固面层表面为接触面.在本文单元的接触控制过程中,选择粘结粗糙接触,摩擦系数为 0.6.有限元模型如图 1 所示.

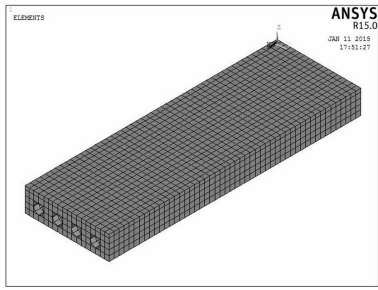


图1 有限元模型图  
Fig. 1 FE model

## 2 抗弯性能试验研究与有限元分析

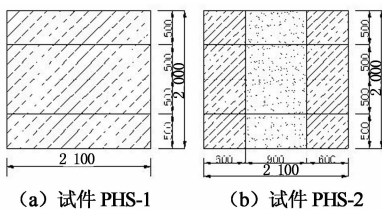
### 2.1 抗弯性能试验

试验选用3组试件,编号分别为 PHS-1, PHS-2

和 PHS-3, 每组试件由4块预制空心板拼成, 选用的单块预制空心板尺寸为  $2\ 100\ \text{mm} \times 500\ \text{mm} \times 120\ \text{mm}$ , 其中试件 PHS-1 板上表面满铺  $20\ \text{mm}$  厚 HP-FL, 试件 PHS-2 板上表面两侧铺  $600\ \text{mm}$  宽  $20\ \text{mm}$  厚 HPFL, 剩余部分使用  $20\ \text{mm}$  厚 M10 素水泥砂浆铺满, 试件 PHS-3 板上表面满铺 M30 素水泥砂浆, 3组试件板下表面均不作处理. 3组试件预制空心板的强度均为 C25, 高性能复合砂浆强度等级为 M25, 试件 PHS-1 和 PHS-2 加固条带处纵横向钢筋网格尺寸为  $150\ \text{mm} \times 150\ \text{mm}$ ,  $\phi^R 4$  钢筋, 钢筋网通过剪切销钉绑扎固定在板上. 施工工序为: 人工凿毛板体表面; 植入剪切销钉; 绑扎钢筋网; 涂抹高性能水泥复合砂浆. 试件加固形式及基本尺寸见图2. 试件的主要参数见表1.

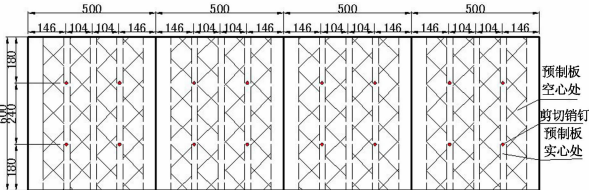
表1 试件参数  
Tab. 1 Specimen parameters

编号	预制空心板强度		砂浆强度		钢筋网中冷轧带肋钢筋力学性能/MPa		
	设计		设计	实测/MPa	屈服强度	极限强度	弹性模量
PHS-1	C25		M25	25.08	648	848	190 000
PHS-2	C25		M25	25.08	648	848	190 000
PHS-3	C25		M30	30.2	—	—	—



(a) 试件 PHS-1

(b) 试件 PHS-2



(c) HPFL 条带剪切销钉和钢筋网示意图

图2 试件尺寸及加固方式示意图

Fig. 2 Size and reinforcement form on specimens

砌筑2排砖墙(轴线距离为  $2.28\ \text{m}$ , 砌筑高度为  $0.6\ \text{m}$ ), 在A轴线最上层第1匹砖下方第1块板对应位置处, B轴线最上层第1匹砖的下方中间2块板对应位置处均放置厚度为  $8\ \text{mm}$  的钢板, 利于装置全部就位后, 掏空支座. 试验墙体及各测点布置如图3所示. 工况1在各试件板面上施加  $2.0\ \text{kN}/\text{m}^2$  均布荷载, 工况2掏空A轴线钢板对应支座, 并考虑动力系数2.0, 增大竖向荷载; 工况3掏空B轴

线钢板对应支座. 工况1模拟预制空心板在楼面均布活载作用下的工作状态, 工况2模拟作为板面边支座的墙体坍塌, 动力系数2.0, 考虑上部荷载作用下的冲击作用, 检验加固板体的抗弯性能, 预制空心板是否坍塌; 工况3在工况2基础上模拟作为板边支座和中间支座的墙体坍塌, 在考虑动力系数2.0作用下, 检验加固板体的抗弯性能. 这3种工况在文献[11]中所研究的汶川地震震害中有着大量的体现, 边支座与中间支座墙体的坍塌造成预制空心板倒塌, 严重影响预制空心板楼、屋盖的安全使用. 通过这3种工况能较好地模拟地震作用下各位置墙体坍塌时对HPFL装配式楼盖的影响[11], 观察板体的弯曲状况并分别记录各板的挠度值, 检验加固板体的抗弯性能.

### 2.2 有限元分析

以典型试验工况为基础, 对上述试验模型进行模拟分析, 建立抗弯有限元模型如图4所示. 分析过程中, 混凝土本构关系由式(1)~(2)确定, 素水泥砂浆和高性能水泥复合砂浆的本构关系由式(3)~(4)确定, 并根据实验前的材性试验, 得出五参数破坏准则 William-Warnke 中各材料的抗压强度和抗拉强

度,混凝土强度取板的设计值强度 C25. 两砖墙底面模拟成固定端,约束三向位移. 模拟过程中,定义 3 个工况. 工况 1 在板面施加竖向均布荷载,大小为  $2.0 \text{ kN/m}^2$ ,并考虑结构自重;工况 2 释放 A 轴线支座边的位移,竖向荷载考虑动力放大系数 2.0;工况 3 在工况 2 基础上释放 B 轴线支座中间板的位移,竖向局部荷载同工况 2 亦考虑动力系数影响,查看模型变形情况和挠度变化.

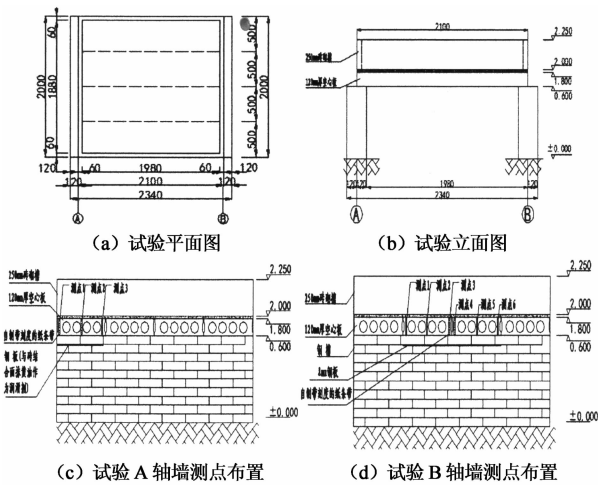


图 3 墙体布置示意图

Fig. 3 Wall settlement mode diagram

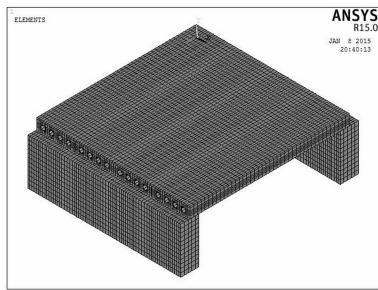


图 4 抗弯试验有限元模型

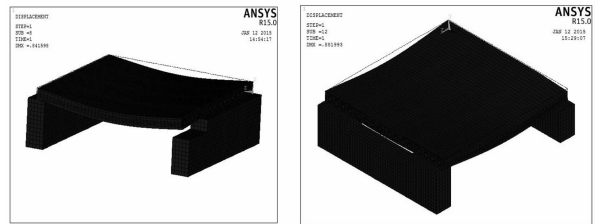
Fig. 4 FE model of bending test

### 2.3 对比分析

经有限元分析,试件 PHS-1 和试件 PHS-2 在模拟工况下的变形基本一致,并未出现刚体位移;而试件 PHS-3 在模拟工况 3 中出现大位移,计算自动终止;在抗弯性能试验中,试件 PHS-3 同样发生了板体坍塌现象,与有限元分析一致. 试件 PHS-1 在 2,3 工况作用下的有限元变形图如图 5 所示,工况 3 作用后试件 PHS-1 和 PHS-2 各测点(如图 3(c)和图 3(d))的最终挠度试验值与计算值以及板缝处开裂弯矩计算值见表 2.

表 2 计算结果与试验结果对比  
Tab. 2 Comparison between calculated values and test values

编号	墙轴号	测点号	挠度试验值 /mm	挠度计算值 /mm	试验板缝弯矩 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	计算板缝弯矩 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )
PHS-1	A 轴	1	14.9	12.1	0.877 5	1.825
		2	9.8	10.3		
		3	0	0		
	B 轴	1	0	0	3.51	7.3
		2	5.2	3.6		
		3	15.2	13.5		
PHS-2	A 轴	1	19.9	15.8	0.877 5	1.3
		2	14.2	13.5		
		3	0	0		
	B 轴	1	0	0	3.51	5.2
		2	7.7	7.2		
		3	14.8	12.9		



(a) 工况 2 变形图

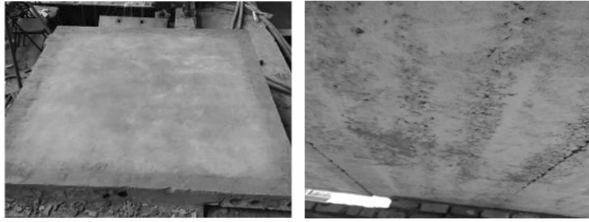
(b) 工况 3 变形图

图 5 试件 PHS-1 变形图

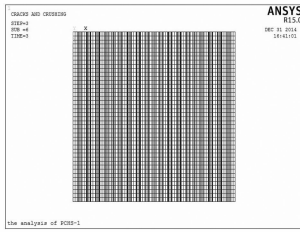
Fig. 5 The specimen PHS-1 deformation figure

由图 5 和表 2 可发现,试验与有限元计算得到的各工况作用下的挠度吻合较好. 从整体上来看,HPFL 加固的两个试件的有限元计算挠度值一般小于试验值,主要是因为有限元计算中高性能水泥复合砂浆的施工缺陷,工况 2,3 中钢板抽出对相邻支座的影响和加载方式等误差忽略导致的挠度偏大. 由试验过程和计算过程可发现,工况 3 后,试件 PHS-1 和 PHS-2 在板面和板底均无裂缝产生,其中试件 PHS-1 的裂缝情况如图 6(a)和(b)所示,试件 PHS-1 的有限元分析裂缝结果如图 6(c)所示. 综上所述,有限元分析与试验结果一致,本文建立的有限元模型能比较准确地进行 HPFL 加固预制空心板抗弯性能的模拟分析. 相同砂浆强度等级的素水泥砂浆加固与 HPFL 加固,素水泥砂浆加固出现单块板体坍塌,HPFL 加固工作性能良好,甚至基本未出

现裂缝,表明 HPFL 加固的预制空心板具有良好抗冲击性能,再一次证明 HPFL 能有效提高预制空心板平面外的抗弯能力.



(a) 板面 (b) 板底



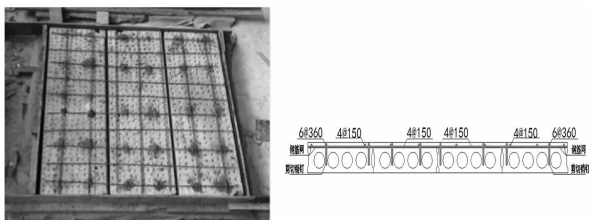
(c) 有限元裂缝图

图 6 试件 PHS-1 裂缝情况  
Fig. 6 The specimen PHS-1 cracks

### 3 抗剪性能试验研究与有限元分析

#### 3.1 抗剪性能试验

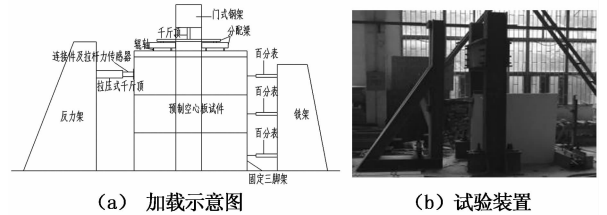
试验选用 6 组试件,每组试件由 3 块预制空心板拼接而成,选用的单块预制空心板尺寸为 1 500 mm × 500 mm × 120 mm. 采用强度等级分别为 M10, M20, M30, M40 和 M50 的高性能复合砂浆和强度等级为 M30 的素水泥砂浆对预制空心板上表面进行满铺加固,砂浆厚度均为 20 mm,下表面均不作处理. 预制空心板的设计强度等级为 C25,采用 HPFL 加固的试件纵横向均配置  $\phi^R 4@150$  钢筋网,钢筋网通过剪切销钉绑扎固定在板上. 施工工序为:人工凿毛板体表面;植入无机植筋胶和剪切销钉;绑扎钢筋网;涂抹高性能水泥复合砂浆. 具体加固形式见图 7.



(a) 绑扎钢筋网示意图 (b) 剪切销钉示意图

图 7 试件加固方式示意图  
Fig. 7 The specimen reinforcement figure

竖向反力架采用门式钢架,在板体和门式钢架之间布置一个机械千斤顶,两块分配钢板和分配钢板之间的辊轴,施加均匀竖向压力于试件上. 试件下部用地锚固定,水平荷载由一台拉压式液压千斤顶施加在第 1 块预制空心板的中心位置. 通过布置在预制空心板一侧的 3 个百分表测定位移,测点分别布置在 3 块板体的中部. 水平力由布置在液压千斤顶和预制板试件之间的力传感器测定. 试验装置如图 8 所示. 首先,施加设计竖向荷载值并保持稳定. 开始试验前,预施加 10 kN 水平荷载,保证仪器和装置处于正常使用状态,卸载. 试件开裂前,采用力控制加载来施加水平荷载,以每 10 kN 为一级递增. 试件开裂后,采用位移控制加载来施加水平荷载,位移控制指标取开裂时位移的整数倍和整毫米数递增,加载至试件破坏.



(a) 加载示意图 (b) 试验装置

图 8 试验装置图  
Fig. 8 Test unit figure

#### 3.2 有限元分析

以典型试验工况为基础,对上述试验模型进行模拟分析,建立抗剪有限元模型如图 9 所示.

分析过程中,混凝土本构关系由式(1)~(2)确定,素水泥砂浆和高性能水泥复合砂浆的本构关系由式(3)~(4)确定,并根据实验前的材性试验,得出 William-Warke 五参数破坏准则中各材料的抗压强度和抗拉强度,混凝土强度取板的设计值强度 C25. 模型底端模拟成固定端,约束三向位移. 加载过程中,分为多个荷载步加载. 第 1 荷载步为施加竖向均布压力,第 2 荷载步开始施加水平荷载,不断加大荷载直至结构破坏.

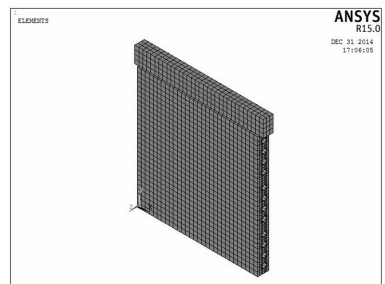


图 9 抗剪试验有限元模型  
Fig. 9 FE model of shear test

### 3.3 对比分析

有限元分析和试验得到的 HPFL 加固预制空心板试件在水平推力作用下的抗剪极限承载力见表 3。由表 3 可知, 试件 JG-1~JG-5 的试验极限荷载与有限元计算值均随着复合砂浆强度的提高而不断增大, 且提高幅度很大, 表明不同复合砂浆强度对加固试件的抗剪性能也有很大差异。比较试件 JG-3 与 JG-6, 由于砂浆强度均为 M30, JG-3 的极限强度试验值为 260 kN, 而试件 JG-6 的极限强度仅为 185 kN, 证明了 HPFL 加固能显著提高装配式楼盖的抗剪性能。

表 3 计算结果与试验结果对比

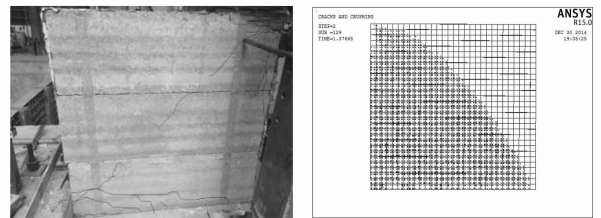
Tab. 3 Comparison between calculated and test values

编号	极限承载力 试验值/kN	极限承载力 计算值/kN	$V^*/V$
JG-1	180	199.8	1.11
JG-2	195	206.2	1.06
JG-3	260	248.1	0.95
JG-4	325	347.3	1.07
JG-5	340	358.3	1.05
JG-6	185	203.8	1.10
V*/V 平均数 1.055			
V*/V 变异系数 0.066			

试验与有限元计算得到的极限荷载吻合较好。试件 JG-1 的极限荷载误差相对较大, 其他试件的误差都不高于 10%。比较有限元计算值与试验值, 除试件 JG-3 外其余试件的有限元计算值均大于试验值, 原因主要是有限元计算为一种较理想状态, 高性能水泥复合砂浆施工缺陷、试验误差及材料本身的离散性没有考虑。计算结果误差平均值 1.055, 变异系数 0.066, 和试验结果基本一致, 证明本文建立的有限元模型适用于 HPFL 加固预制空心板抗剪承载力的模拟分析, 也为 HPFL 加固混凝土结构提供了参考。

以试件 JG-3 为例, 试验过程中, 当加载至极限荷载的 55% 时, 首先在最下部预制板未加固面位移约束处出现横向水平裂缝, 随荷载增大, 逐渐形成斜裂缝; 继续加载最下部预制板未加固面位移约束处部分混凝土表面脱落, 当加载至极限荷载的 80% 左右时加载点处出现沿板缝方向的水平裂缝, 继续加载直至试件破坏, 裂缝情况如图 10(a) (从未加固面看) 所示。计算过程中, 当加载至极限荷载的 58% 时, 在最下部预制板未加固面位移约束处出现横向水平裂缝, 随着荷载增加底部板横向水平裂缝不断延伸并出现沿对角线方向的斜裂缝, 当加载至极限

荷载的 82% 时加载点处出现沿板缝方向水平裂缝并不断延伸, 达到极限荷载时, 最下部预制板以及加载点处 HPFL 和预制板几乎全裂, 达到极限承载力计算终止。JG-3 有限元分析最终裂缝图如图 10(b) (从加固面看) 所示。试验得到的部分试件第一块预制空心板中部的力-位移与有限元计算得到的板一侧的力-位移曲线对比如图 11 所示, 本文采用修正的 N-R 法, 当结构开裂较多或接近极限荷载时, 存在严重的收敛问题, 无法计算负刚度下降段, 因此在破坏阶段无法模拟。



(a) 试验裂缝图

(b) 有限元裂缝图

图 10 试件 JG-3 裂缝情况

Fig. 10 The specimen JG-3 fracture

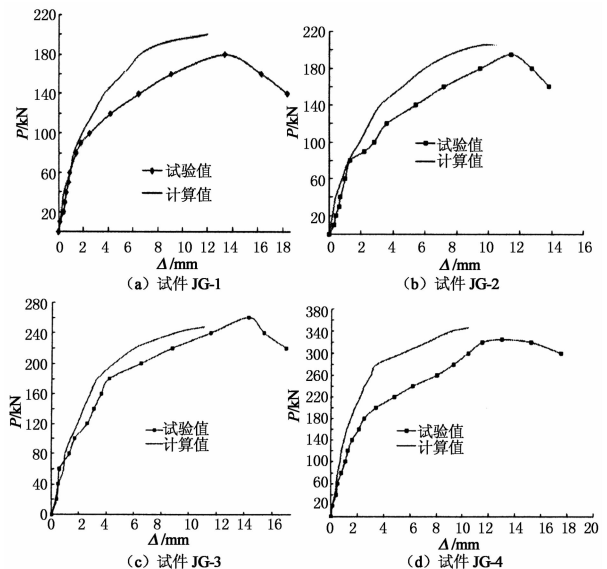


图 11 力-位移曲线对比

Fig. 11 Force-displacement curve comparison

## 4 影响 HPFL 加固预制空心板抗剪性能的因素

影响 HPFL 加固预制空心板抗剪性能的主要因素包括 HPFL 加固层砂浆强度、HPFL 加固层钢筋网尺寸、HPFL 加固条带宽度和预制空心板板体拼装方向等。结合有关研究和工程经验, 建议采用的加固面层复合砂浆厚度为 20 mm, 钢筋网中钢筋选用冷轧带肋钢筋  $\phi^R 4$ , 通过已建立的分离式有限元

模型,分析以上因素对 HPFL 加固预制空心板抗剪性能的影响。

#### 4.1 HPFL 加固层砂浆强度

上述试验采用 5 个强度等级的复合砂浆研究了 HPFL 满铺时加固面层砂浆强度对加固效果的影响.同时对 5 个试件进行了有限元模拟,分析不同砂浆强度对预制空心板加固试件在水平荷载下的抗剪承载力和破坏形式的影响,有限元计算结果见表 4. HPFL 满铺加固后,预制空心板在水平剪力作用下的开裂荷载和极限荷载随加固面层砂浆强度的提高而提高,且提高幅度很大.当砂浆强度为 M30~M40 时,承载力提高幅度最大,从安全性和经济性原则考虑,建议选用此区段强度进行加固。

表 4 HPFL 加固层砂浆强度影响的计算结果

Tab. 4 Calculated results of the effects of different surface course mortar's strength

编号	加固面层 砂浆强度	开裂荷载 /kN	极限抗剪 承载力/kN	承载力提 高率/%
M-1	M10	98.5	199.8	—
M-2	M20	144.5	206.2	3.2
M-3	M30	118.0	248.1	24.2
M-4	M40	260.4	347.3	73.8
M-5	M50	240.8	358.3	79.3

#### 4.2 HPFL 加固层钢筋网尺寸

影响 HPFL 加固混凝土构件性能的因素包括加固面层钢筋网格尺寸<sup>[12]</sup>.试验中,HPFL 满铺加固预制空心板采用的钢筋网格尺寸为 150 mm × 150 mm,为了研究 HPFL 加固预制空心板中钢筋网格尺寸的影响,采用抗剪试验试件,加固面层砂浆强度为 M30,采用不同钢筋网格尺寸(60 mm × 300 mm,60 mm × 150 mm,60 mm × 60 mm,150 mm × 300 mm,150 mm × 150 mm 和 300 mm × 300 mm)分析加固预制空心板试件的抗剪承载力,建立有限元模型,计算结果如表 5 所示.随着加固层钢筋网格尺寸的加密,即加固层的配筋率增大时极限抗剪承载力增大,但增大幅度不明显.可以得出在满足 HPFL 加固面层适配筋的要求下加密钢筋网格尺寸对抗剪性能提高不明显,其主要是起形成加固层骨架和增强两者之间粘结的作用,使两者构成整体并增强抗剪过程中的延性.从经济性考虑,建议钢筋网格尺寸适当即可。

#### 4.3 HPFL 加固条带宽度

试验中,HPFL 加固预制空心板试件均采用满铺方式,考虑试件尺寸如上所述,其中预制空心板强度为 C25,加固层砂浆厚度为 20 mm,复合砂浆强度

为 M30,加固层钢筋网格尺寸为 150 mm × 150 mm,在竖向压力作用下,对上表面两端 HPFL 条带宽度为 100 mm,200 mm,400 mm,600 mm(其余部分用 M10 素水泥砂浆填平)和上表面满铺 HPFL 的预制空心板试件在竖向压力和水平荷载作用下的抗剪承载力进行分析,计算结果如表 6 所示.加固条带对抗剪承载力的影响很显著,随着加固条带宽度增大,极限抗剪承载力与宽度近似成正比关系增大.这主要是由于加固条带的加固性能明显优于一般的素水泥砂浆,宽度越大,影响因子也随之增大。

表 5 HPFL 加固层钢筋网格尺寸影响的计算结果

Tab. 5 Calculated results of the effects of steel mesh sizes

试件编号	钢筋网格尺寸 /(mm×mm)	极限抗剪 承载力/kN	承载力提高率 /%
MS-300300	300 × 300	243.5	—
MS-150300	150 × 300	245.3	0.7
JG-3	150 × 150	248.1	1.9
MS-60300	60 × 300	251.2	3.2
MS-60150	60 × 150	254.1	4.4
MS-6060	60 × 60	261.5	7.4

表 6 HPFL 加固条带宽度影响的计算结果

Tab. 6 Calculated results of the effects of strengthening band width

试件 编号	加固条带宽度 /mm	极限抗剪承载力 /kN	承载力提高率 /%
JG-D100	100	100.1	—
JG-D200	200	152.8	52.6
JG-D400	400	174.4	74.2
JG-D600	600	205.4	205.2
PCHS-3	满铺	248.1	247.8

#### 4.4 预制空心板板体拼装方向

为研究预制空心板板体拼装方向对 HPFL 加固效果的影响,考虑预制空心板强度为 C25,试件尺寸如上所述,其中加固层砂浆厚度为 20 mm,加固层钢筋网格尺寸为 150 mm × 150 mm,在竖向压力作用下,板件上表面进行满铺加固,分析预制空心板上满铺强度为 M10,M20 和 M30 的素水泥砂浆和满铺强度为 M10,M20 和 M30 的 HPFL 时,板体竖拼的预制空心板加固试件在竖向压力和水平荷载作用下的抗剪承载力,计算结果如表 7 所示.从表 7 可以看出,HPFL 加固预制空心板能同时提高其两个方向的抗剪极限承载力,加固面层砂浆强度在 M30 左右时,加固效果较为明显.比较预制空心板两个方向的抗剪承载力,平行于板中孔洞方向的承载力高于垂直方向,但经过 HPFL 加固后,两者之间差异不大,造成差异的原因主要是由于孔洞薄弱区的存在。

表 7 预制空心板竖拼计算结果

Tab. 7 Calculated results with precast slab vertical spicing

试件 编号	素水泥 砂浆强度	加固面层 砂浆强度	极限抗剪 承载力/kN	承载力 提高率/%
M10	M10	—	112.4	—
JG-1	—	M10	116.5	3.6
M20	M20	—	127.6	—
JG-2	—	M20	144.1	12.9
M30	M30	—	146.3	—
JG-3	—	M30	178.5	22.0

## 5 结 论

1) 试验结果与计算结果表明, HPFL 加固的预制空心板在外墙体倒塌的情况下仍能有效保持整体性,具有一定的抗弯能力和平面外稳定性,不致板体坍塌,与素水泥砂浆抹面的预制空心板相比抗弯性能明显提升,承载力显著提高; HPFL 加固的预制空心板在水平剪力作用下裂缝形态为斜裂缝,两个方向的抗剪性能较素水泥砂浆抹面预制空心板提高很大,有效提高了平面内两个方向的承载力。

2) 对 HPFL 加固预制空心板进行了数值模拟,与试验结果吻合较好,证明该有限元模型适用于 HPFL 加固预制空心板的模拟分析,同时也为 HPFL 加固混凝土结构的模拟分析提供了参考。

3) 随着加固面层砂浆强度的提高,板体的抗剪承载力提高很大;随着加固条带宽度增加,极限抗剪承载力大幅度提高;随着加固面层钢筋网格尺寸的加密,极限抗剪承载力略有增大,在满足配筋要求下加密加固层钢筋网格尺寸对抗剪承载力提高不明显; HPFL 加固预制空心板能同时提高两个方向的抗剪极限承载力;综合承载力和经济因素考虑,本文建议选用较高强度等级复合砂浆和较大宽度条带 HPFL 进行加固,钢筋网格尺寸满足最小配筋率即可。

4) 经组装后的 HPFL 装配式楼盖在水平剪力作用下抗剪强度较大,较预制空心楼盖更能满足平面内两个方向刚度无穷大的条件,且省去了装模板过程。为预制空心板在地震区的重新推广使用,提供了一种新的装配式方案。

## 参 考 文 献

[1] 李向民,张富文. 粘贴不同 FRP 布加固预制空心板的试验研究和计算分析[J]. 土木工程学报,2014,47(2):71-81.  
LI Xiang-min, ZHANG Fu-wen. Experimental study and computational analysis on PC hollow-core slabs strengthened with different FRP strips [J]. China Civil Engineering Journal, 2014,47(2):71-81. (In Chinese)

[2] 贾廷跃. 碳纤维加固空心板试验研究与承载规律分析[J]. 公路工程,2009,34(1):30-34.

JIA Ting-yue. Experimental research and flexural analysis on hollow slabs strengthened with carbon fiber reinforced polymer [J]. Highway Engineering, 2009, 34(1):30-34. (In Chinese)

[3] 李曰辰,李秀君. 粘型钢加固预应力空心板[J]. 科学技术与工程,2010,10(25):6327-6329,6337.  
LI Yue-chen, LI Xiu-jun. Strengthen prestressed hollow by section-steel bonded [J]. Science Technology and Engineering, 2010,10(25):6327-6329,6337. (In Chinese)

[4] 尚守平,狄国伟,刘君,等. 喷射高性能水泥复合混凝土加固石拱桥试验研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2014,41(9):1-7.  
SHANG Shou-ping, DI Guo-wei, LIU Jun, et al. Experimental investigation on stone-arch bridge strengthened with injecting high performance cement composite concrete [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014,41(9):1-7. (In Chinese)

[5] 尚守平,刘涛. HPFL 加固混凝土结构斜截面承载力计算及工程应用[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2011,38(2):1-7.  
SHANG Shou-ping, LIU Wei. Calculation of diagonal section resistance and engineering application of strengthening RC structures using HPFL [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2011,38(2):1-7. (In Chinese)

[6] 林峰,欧智星. 截面预裂的 OH 构件直剪与斜剪承载力比较[J]. 建筑结构,2014,44(19):75-80.  
LIN Feng, OU Zhi-xing. Comparison on the ultimate bearing capacities of direct shear oblique shear for RC member with pre-cracked sections [J]. Building Structure, 2014,44(19):75-80. (In Chinese)

[7] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:34-35.  
GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010:34-35. (In Chinese)

[8] 尚守平,雷敏. HPFL 加固空斗墙抗震性能试验研究与有限元分析[J]. 地震工程与工程震动,2013,33(4):218-227.  
SHANG Shou-ping, LEI Min. Test study on seismic behavior and finite element analysis of row lock wall strengthened with HPFL [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013,33(4):218-227. (In Chinese)

[9] 陆新征,谭壮. FRP 布-混凝土界面粘结性能的有限元分析[J]. 工程力学,2004,21(6):45-50.  
LU Xin-zheng, TAN Zhuang. Finite element analysis of debonding at the interface between FRP sheet and concrete [J]. Engineering Mechanics, 2004,21(6):45-50. (In Chinese)

[10] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007:440-442.  
WANG Xin-min. ANSYS numerical analysis of engineering structure[M]. Beijing: China Communication Press, 2007:440-442. (In Chinese)

[11] 陈科荣. 汶川地震灾区部分城镇的房屋震害分析[J]. 福建建筑,2008,124(10):79-81.  
CHEN Ke-rong. The analysis of seismic damages of buildings in some cities and towns after wenchuan earthquake [J]. Fujian Architecture & Construction, 2008,124(10):79-81. (In Chinese)

[12] 廖书堂. 水泥砂浆、钢筋网水泥砂浆加固转强的简化计算[J]. 四川建筑科学研究,1979,5(12):29-37.  
LIAO Shu-tang. The simple calculation about the brick walls strengthened by cement mortar and mesh reinforcement [J]. Sichuan Building Science, 1979,5(12):29-37. (In Chinese)