

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2015.01.002

HPFL 加固双向简支板抗弯性能研究

黄 艳, 蒋隆敏, 李红军, 贺伟鸿

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为了研究用高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层 (HPFL) 加固 RC 双向简支板的抗弯性能, 对同参数的 1 块对比板和 4 块 HPFL 加固板进行试验, 并用有限元软件 ANSYS 进行模拟。试验研究与数值模拟结果均表明: 与未加固板相比, 加固板的抗弯承载力与刚度都有较大提高, 加固后板的抗裂性能明显改善, 从而验证了 HPFL 加固 RC 板能改善其抗弯性能。还采用塑性铰线理论对该类加固板的承载力进行了分析和计算, 计算结果与试验结果及数值模拟结果相似程度较高。

关键词: 高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层; 双向简支板; 二次受力加固; 塑性铰线理论

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2015)01-0010-07

Study on Flexural Properties of Bidirectional Simply Supported Slab Reinforced with HPFL

Huang Yan, Jiang Longmin, Li Hongjun, He Weihong

(School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In order to study the flexural capacity of reinforced RC bidirectional simply supported slab of high-performance cement Ferro cement laminate (HPFL), made experiments on 1 contrasting plate and 4 HPFL reinforcement plates with the same parameters, and simulated with ANASYS software. The experimental result and the simulated result both indicated that compared with the non reinforcement plate, the reinforcing plate flexural bearing capacity and stiffness were greatly improved, and crack resistance performance of reinforcement plate was obviously improved. It was confirmed that the HPF-reinforced RC plate was capable of improving the plate flexural performance. The plastic hinge line theory was adopted to analyze and calculate the bearing capacity of the reinforcement plates, and the calculating result was highly similar to the test and numerical simulation results.

Keywords: high performance ferrocement laminate (HPFL); bidirectional simply supported slab; the secondary stress reinforcement; yield line theory

高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层 (high performance ferrocement laminate, HPFL) 加固法, 在钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 结构中因具有加固效果显著、易施工、造价低廉、防火耐高温、耐久抗老化, 与原构件混凝土相容性和协调性好等优点, 近年来得到了较好的推广和应用, 并创造了可观的

经济效益和社会效益。目前用 HPFL 加固梁、柱、墙的研究较多^[1-4], 如尚平等对 7 根三面 U 型加固梁和 1 根未加固对比梁从加固界面原混凝土表面粗糙度、初始荷载 2 个方面进行了高温抗剪试验研究。迄今为止, 用该技术加固 RC 板的研究还很少。为此, 本文通过对 5 块双向简支板分别进行一次受力和二次

收稿日期: 2014-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51058001), 湖南省大学生研究性学习和创新性实验计划基金资助项目(湘教通[2013]-191)

作者简介: 黄 艳 (1989-), 男, 湖南娄底人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型材料在结构加固中的应用,

E-mail: 642745412@qq.com

受力加固试验研究, 然后对加固板进行有限元模拟分析, 得出了一些有意义的结论, 并建立了加固板的承载力计算公式。

1 试验方案

1.1 试件设计及材料参数

本试验共制作了5块完全相同的RC双向板, 其中1块为不加固的对比板, 其余4块为加固板。各板的尺寸均为1500 mm × 1500 mm × 80 mm; 板筋为单层双向配筋, 均为 $\Phi 6@200$ mm; 混凝土强度等级定为C30, 板的混凝土保护层平均厚度为15 mm; 加固层使用高性能水泥复合砂浆, 复合砂浆配合比参照文献[5], 厚度为20 mm, 加固层钢筋为热扎带肋钢筋, 直径为6 mm。试验所用材料参数见表1。

表1 材料参数

材料	立方抗压强度 f_{cu}/MPa	屈服强度 F_y/MPa	极限强度 f_t/MPa
板内钢筋		249	367
加固层钢筋		349	463
混凝土	32.8		
高性能水泥复合砂浆	45.5		

1.2 加固方案

将5块试验板编号为B1, B2, B3, B4, B5, 其中B1为对比板, 不加固; B2, B4为一次受力加固板, B3, B5为二次受力加固板, 具体加固方案见表2。

表2 板的加固方案

试验板编号	加固方式	加载方案	备注
B1	不做处理	直接加载	对比板
B2	用HPFL满铺加固, 加固层钢筋网间距为150 mm	先加固再加载	一次受力加固板
B3	用HPFL满铺加固, 加固层钢筋网间距为150 mm	预先加载到B1板限荷载的60%, 然后持载进行加固	二次受力加固板
B4	用HPFL满铺加固, 加固层钢筋网间距为100 mm	先加固再加载	一次受力加固板
B5	将破坏后的B1板用HPFL满铺加固, 加固层钢筋网间距为100 mm	将已加载至破坏后的B1板卸载后加固	卸载加固板

HPFL加固双向简支板施工的基本工艺参照相关技术指南^[6-7]。由文献[8]可知, 在均布荷载作用下, 双向简支板的对角线区域会发生开裂, 因此, 为了保证销钉对加固层的锚固作用, 应避免在板的这一部位植入销钉, 加固板销钉植入位置详见图1。

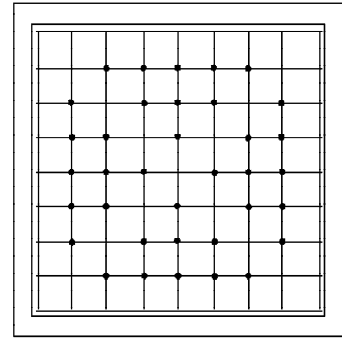


图1 间距为150 mm × 150 mm的钢筋网及销钉布置

Fig. 1 The reinforced net of 150 mm × 150 mm and pin layout

1.3 试验装置及试验方法

试验装置如图2所示, 具体包括: 大型反力架1个, 由4个长1500 mm的16号传力工字钢梁焊接成的钢圈梁1个, 荷载传感器1个, 千斤顶1个, 尺寸为350 mm × 150 mm × 810 mm的钢墩4个, 尺寸为650 mm × 650 mm × 10 mm的钢板1块, 应变采集仪2台, 应变片若干, 百分表8个, 裂缝观测仪1台。

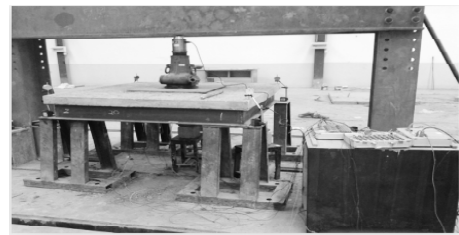
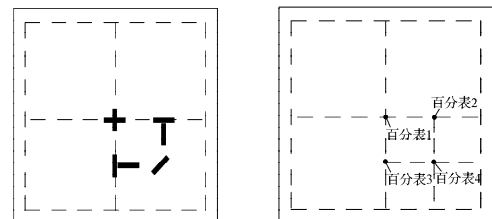


图2 板受力加固试验装置图

Fig. 2 The test device of force plate reinforcement

为了模拟实际简支板的边界状态, 试验中把板搁在钢圈梁上边, 模拟四边简支; 在板上部搁置1块尺寸为650 mm × 650 mm × 10 mm的钢板作为力分散板, 从而模拟均布荷载。本试验采用静力加载法, 使用千斤顶手动加载来实现。为了试验方便, 将千斤顶置于力分散板上, 采用从上往下的加载方式, 加载的荷载值由一个连接应变仪的力传感器控制, 传感器已预先标定。板混凝土应变与加固层复合砂浆应变及钢筋应变都通过电阻应变片测量, 应变片布置见图3a, 通过百分表采集板关键点的挠度变化, 百分表布置见图3b。



a) 应变片布置图

b) 百分表布置图

图3 应变片与百分表布置图

Fig. 3 The strain gauge and the dial gauge layout

2 试验结果与分析

2.1 主要试验现象与破坏特征

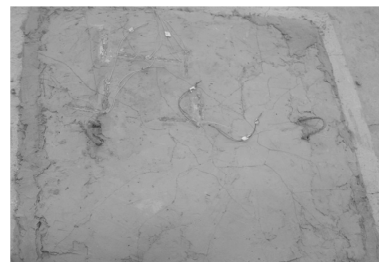
试验时, 5块板最终裂缝分布情况见图4。



a) B1板



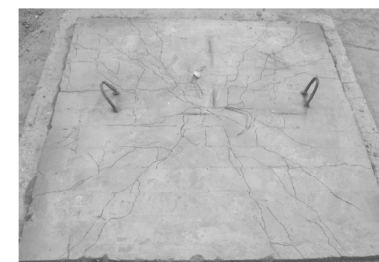
b) B2板



c) B3板



d) B4板



e) B5板

图4 B1~B5板底裂缝分布情况

Fig. 4 The bottom crack distribution of B1~B5 plates

在试验过程中, 随着荷载的增加, 各板在板底中央最先出现一条正弯曲裂缝。其中 B1 在荷载加至

20 kN 时, 板底中部出现初始裂缝, 与板边约成 45° 角; 随着荷载进一步增加, 板底裂缝迅速沿 4 个板角延伸, 最后发展到角点, 此时板中央的裂缝宽度约为 2 mm, 板中心点处挠度也较大, 说明板呈现的是受弯破坏。

将一次受力加固板 B2 和 B4 与对比板 B1 进行比较, 发现加固后构件 B2 和 B4 的开裂荷载分别提高了 50% 和 75%, 这是因为加固层钢筋与板内钢筋一起参与受力, 提高了板的抗裂性能。随着荷载的增加, 其裂缝发展速度比 B1 板更加缓慢, 这是因为加固层钢筋提高了板的刚度, 同时增加了对原板混凝土的约束。B2 与 B4 板对比发现: 对于 B2 板, 板底裂缝慢慢向 4 个板角延伸, 最终板底 2 条主裂缝相互贯通, 延伸至板边, 板底中央裂缝宽度约 1 mm, 较 B1 板有所减小, 最终 B2 板发生弯曲破坏。对于 B4 板, 由于加固层钢筋配筋率过大, 随着荷载的增加, 最终铆钉发生剥离, B4 板发生剥离破坏。

对于二次受力加固板 B3 和 B5, 其中 B3 为持载加固 (加载到 B1 极限荷载的 60%, 板底已开裂, 再持载加固), 待 B3 加固完成后继续加载, 随着荷载的增加, 加固层出现裂缝, 但裂缝发展速度比 B1 板慢, 裂缝最终缓慢延伸至板边, 而此时板底加固层裂缝宽度接近 1 mm, 比板 B1 有所减小, 但板最后的破坏形态仍然是受弯破坏。板 B5 是在板 B1 发生破坏后进行加固修复的构件, 其开裂荷载为 20 kN, 与板 B1 开裂荷载一样大, 而随着荷载的增加, 其裂缝发展速度比 B1 板慢, 板底裂缝最终宽度为 1 mm 较 B1 板小。

2.2 主要试验结果与分析

图 5 中 a, b, c 分别是 B1, B2, B3 板底各测点的荷载-挠度曲线, 图 5d 是部分板的板中央荷载-挠度曲线。由图 a, b, c 可知, 在同级荷载下, 各板中心点处 (百分表 1) 的挠度最大。从图 a 可以看出, B1 板弯曲破坏有 3 个阶段: 第一阶段为开裂前的弹性阶段, 第二阶段为开裂后的弯曲开裂阶段, 第三阶段为钢筋屈服后的破坏阶段。从图 5b 可以看出, 一次受力加固板 B2 的破坏阶段类似 B1 板。从图 5c 可以看出, 二次受力加固板 B3 破坏有 4 个阶段: 第一阶段为开裂前的弹性阶段, 第二阶段为加固层开裂前的弹性阶段, 第三阶段为开裂后弯曲开裂阶段, 第四阶段为钢筋屈服后的破坏阶段。

从图 5a 可以看出, 板 B1 当荷载为 20 kN 时各测点挠度出现突变, 这是因为板出现初始裂缝, 整体刚度下降; 当荷载加到 55 kN 左右, 板内钢筋屈服, B1 完全破坏, 板的最大挠度 24.1 mm。从图 5b 可以看

出,一次受力加固板B2在荷载为30 kN时出现初始裂缝,板的刚度下降,挠度发生突变;当荷载加到120 kN时,B2完全破坏,板中心点处最大挠度为17.2 mm。从图5c可以看出,二次受力加固板B3在荷载为35 kN时挠度曲线斜率突变,因为此时加固层参与受力,板的整体刚度大大增加;当荷载为65 kN时,挠度曲线斜率再次突变,因为此时加固层开裂板的整体刚度下降;当加载到110 kN时试件完全破坏。由图5c可知,板中心点处最大挠度为29.3 mm。

由图5 b, c与图5a对比分析可知,HPFL加固双向简支板能有效提高板的抗弯极限承载力,其中一次受力加固板较对比板的开裂荷载提高了50%,屈服荷载提高了83%,极限荷载提高了118%,因为加固层钢筋与板内原配钢筋同时一起承担荷载,对板的混凝土起到了很好的约束作用,大大的提高了板的抗弯承载能力;二次受力加固板B3由于在加固前原板已经开裂,在持载加固状态下,加固层钢筋与原板内钢筋存在滞后应变,导致B3比B1开裂荷载提高了225%,屈服荷载提高了95%,极限荷载提高了104%。

从图5d中各曲线的斜率变化可以看出,HPFL加固双向板可有效改善板的刚度。从B2曲线与B3, B5曲线对比可看出,HPFL加固在一次受力情况下要比在二次受力情况下更明显地提高了板的刚度与承载能力,由不卸载加固板B3曲线与完全破坏后卸载加固板B5曲线可以看出,HPFL加固破坏板可以有效恢复板的承载能力。

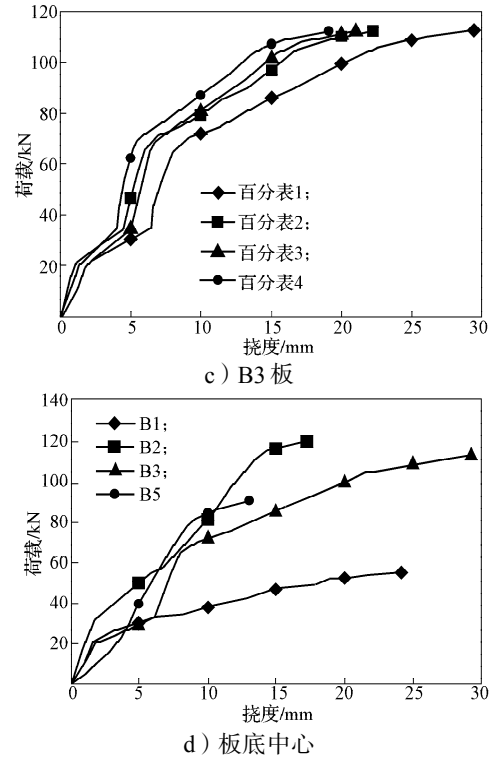
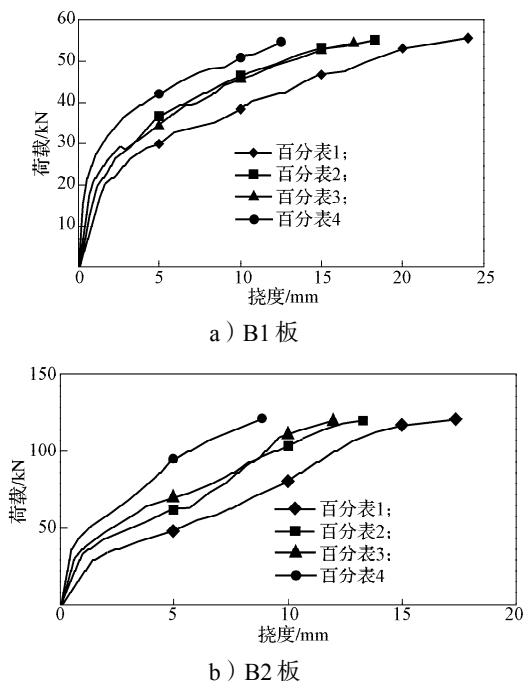


图5 荷载与挠度关系曲线

Fig. 5 The relationship curves of plate load and deflection

3 板的塑性理论分析

本文采用塑性铰线理论来分析加固板的受力性能并计算其极限承载力,先作如下基本假定:

- 1) 板达到极限承载力状态时,在板的最大弯矩处形成塑性铰线。
- 2) 板塑性铰线处的变形远超过板块的弹性变形,故可把各板块看成是刚性体,当达到板的极限承载力时,各板块绕塑性铰线转动。
- 3) 在板塑性铰线处,具有一定的塑性弯矩,且弯矩铰线上的剪力和扭矩均可近似为0,因此板的荷载只由塑性铰线的弯曲作用来承担。

双向板在均布荷载作用下形成的塑性铰线如图6所示。

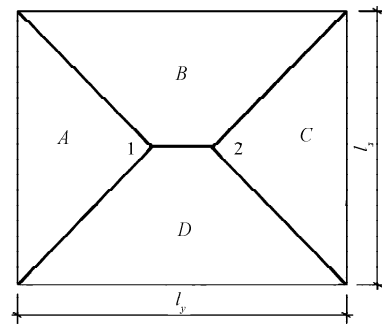


图6 四边简支双向板塑性铰线模式

Fig. 6 The plastic hinge line model of four edges simply supported bidirectional board

由文献[9]可知,双向板在简支条件下所受的均布荷载满足塑性铰线法的基本方程

$$M_x + M_y = \frac{q_u l_x^2}{24} (3l_y - l_x), \quad (1)$$

式中: M_x, M_y 分别为沿板跨内塑性铰线上 l_x 和 l_y 方向的总极限正弯矩;

l_x, l_y 分别为长、短边边长;

q_u 为板上极限均布荷载。

公式(1)表明了双向板上极限均布荷载 q_u 与塑性铰线上总弯矩的关系。本试验中双向板边长均为 l ($l=l_x=l_y$), 故可将式(1)简化为

$$M_x + M_y = \frac{q_u l^3}{12}. \quad (2)$$

根据式(2)可求得对比板的极限荷载。

本试验采用的 HPFL 加固,即在板底加了一层高性能水泥砂浆钢筋网薄层,一次受力加固板与对比板比较,前者按塑性铰线法的内力计算过程与后者基本相同,只是加固层的存在,使双向板塑性铰线上单位板宽内的极限弯矩 M 较后者增加了。下面求解加固板的极限弯矩 M , 加固后构件截面简图如图7所示。图中 b 为单位宽度, h 为原构件的高度, h_0 为原构件截面的有效高度, h_1 为加固后构件的高度, A_s 为原构件受拉钢筋面积, A_{sm} 为单位板宽内复合砂浆钢筋网的钢筋截面面积, t 为加固层厚度。

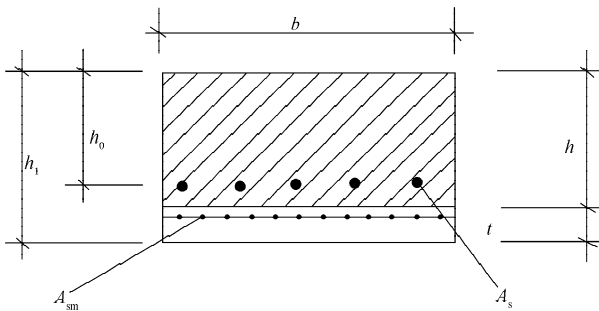


图7 加固后的构件截面图

Fig. 7 The reinforced component section diagram

取单位板宽进行计算分析,计算分析简图如图8所示。图中 x 为受压区高度; h_2 为加固后截面有效高度; M 为板截面的极限弯矩; c 为受压区等效压应力, $c=f_c b x$, 其中 f_c 为混凝土抗压强度设计值; T_s 为原构件钢筋受拉应力, $T_s=f_y A_s$, 其中 f_y 为原构件钢筋屈服强度; T_{sm} 为加固层受拉拉应力, $T_{sm}=\sigma_t b t$, 其中 σ_t 为加固层应力, 在一次受力加固情况下, $\sigma_t=0.9 A_{sm} f_{smy} / b t$, f_{smy} 为加固层钢筋屈服强度, 在二次受力加固情况下, 因为存在滞后应变, $\sigma_t=E_s \varepsilon_{smr}$, E_s 为钢筋的弹性模量, ε_{smr} 为实际应变。

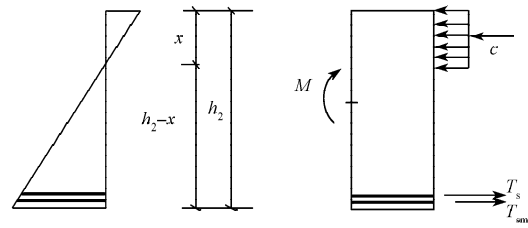


图8 极限弯矩的计算简图

Fig. 8 Sketch of ultimate moment calculation

由力平衡与力矩平衡条件可得, 极限弯矩的计算公式为

$$M = f_y A_s (h_0 - x/2) + \sigma_t b t (h_2 - x/2). \quad (3)$$

算出极限弯矩 M 后, 根据式(2)可求得一次受力加固板的极限承载力。

对二次受力加固板, 由于在加固前, 原板存在一定的损伤与挠度, 在对板进行 HPFL 加固后继续加载, 加固层钢筋相对一次受力加固板的受荷, 存在初始差应变, 即滞后应变。根据平截面假定^[10]求出滞后应变 ε_{sm0} 与名义应变 ε_{sm} , 可求得加固层钢筋的实际应变 $\varepsilon_{smr} = \varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sm0}$, 再由实际应变 ε_{smr} 求得实际应力 $\sigma_t = E_s \varepsilon_{smr}$, 把 σ_t 代入式(3)中即可求得二次受力加固板的极限弯矩 M 。再根据式(2)可求得二次受力加固板的极限承载力。

下面计算滞后应变。钢筋混凝土滞后应变计算简图如图9所示, 图中 h_{c0} 为混凝土受压区高度, M_0 为初始荷载在截面产生的初始弯矩值, ε_{c0} 为对应初始弯矩混凝土的压应变, ε_{s0} 为对应初始弯矩板内钢筋的应变, ε_{sm0} 为对应初始弯矩加固层钢筋的滞后应变, F_{c0} 为对应初始弯矩的混凝土等效压应力, T_{s0} 为对应初始弯矩的原构件钢筋拉应力。

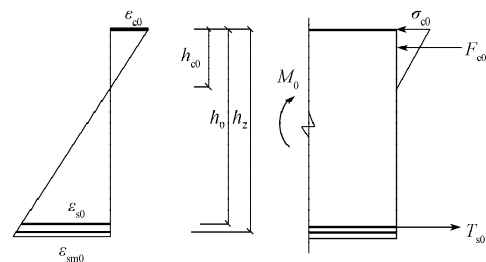


图9 钢筋混凝土滞后应变计算简图

Fig. 9 Sketch of reinforced concrete strain lag calculation

由平面假定及截面应变几何关系可得

$$\frac{\varepsilon_{s0}}{h_0 - h_{c0}} = \frac{\varepsilon_{c0}}{h_{c0}}. \quad (4)$$

由力平衡和弯矩平衡条件, 可得滞后应变计算公式

$$\varepsilon_{sm0} = \frac{2M_0(h_2 - h_{c0})}{E_c h_{c0}^2 b(h_0 - h_{c0}/3)}, \quad (5)$$

式中 E_c 为混凝土的弹性模量。

表3是理论计算值与实验值的对比,从表中可看出理论计算值与试验值较吻合。

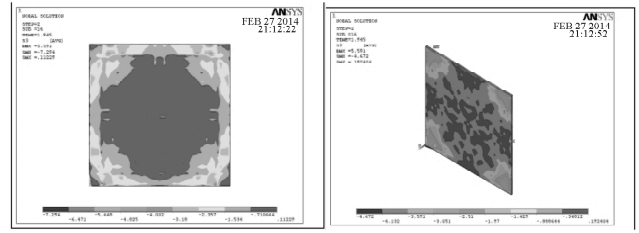
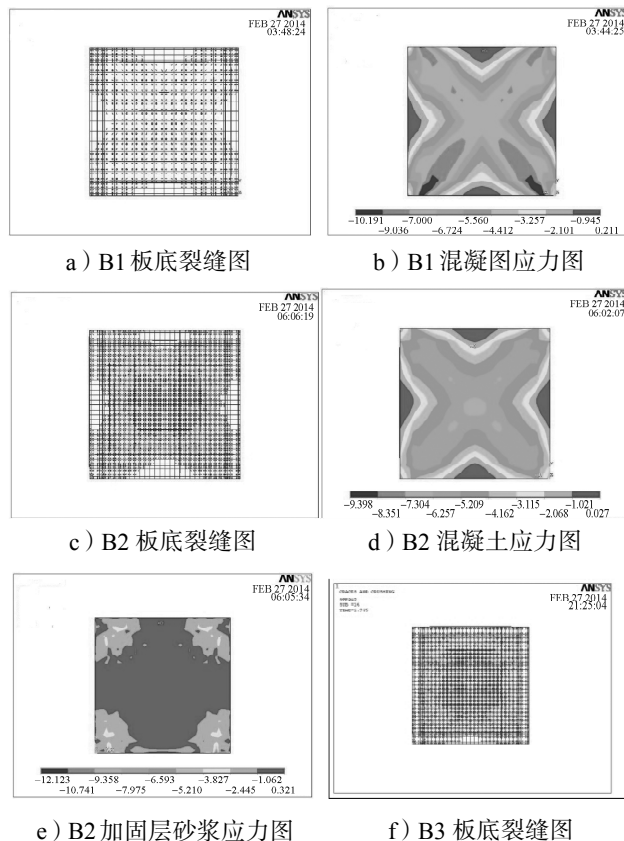
表3 各板极限承载力的试验值与计算值对比

Table 3 Contrast of the tested value and calculated value of plate ultimate bearing capacity

试验板	极限承载力 / kN		计算值 / 试验值
	试验值	计算值	
B1	55	41	0.75
B2	120	129	1.07
B3	110	120	1.09
B4	120	168	1.40

4 模拟分析

阅读相关文献^[11],了解到钢筋混凝土结构的有限元模型主要有整体式、分离式和组合式3种,而分离式有获得较多数据分析的优点。因此,本文用ANSYS有限元分析软件,采用分离式建模,对对比板B1、一次受力板B2和二次受力板B3进行有限元模拟分析,得到各板在极限荷载下的裂缝图以及应力云图,如图10所示。



g) B3混凝土应力图 h) B3加固层砂浆应力图

图10 各板有限元模拟结果

Fig. 10 The finite element simulation results for plates

由图10的模拟结果可知,当达到极限荷载时,B1, B2, B3板底部均出现4条与板边约成45°角的裂纹。B1的承载能力为52 kN, B2和B3的承载能力分别为116 kN和119 kN。将有限元计算结果与试验值和理论计算值对比,见表4。

表4 板的极限承载力模拟值与试验值、计算值对比

Table 4 Contrast of the simulation value, calculated value and the test value of the plate ultimate bearing capacity

试验板	极限承载力 / kN			模拟值 / 试验值	
	模拟值	试验值	计算值	模拟值 / 试验值	模拟值 / 计算值
B1	52	55	41	0.95	1.26
B2	116	120	129	0.97	0.90
B3	119	110	120	1.08	0.99

从表4可知,有限元模拟值和试验值、计算值都比较吻合。模拟结果表明,经HPFL加固能有效提高RC双向板的刚度和板的抗弯承载力,这也进一步验证了理论计算的准确性。

5 结论

通过对HPFL加固的双向简支板试验研究与理论分析及数值模拟分析,可以得出以下主要结论:

- 1) HPFL加固双向简支板,能有效提高板的承载能力和板的刚度,改善板的抗裂性能。
- 2) HPFL在一次受力下加固要比在二次受力下加固对板的承载力与刚度提高得更加明显。因此在对板进行加固时,尽量对板进行卸载。
- 3) 由B5的试验结果可得,即使板已完全破坏,经HPFL加固后,其承载力能达到其原构件承载力的1.64倍,加固效果十分明显。
- 4) 本文基于塑性铰线理论计算HPFL加固板极限承载力的方法,其计算结果与实验结果吻合且满足一定的精度要求。
- 5) 有限元模拟结果与试验结果两者吻合较好,说明用有限元来模拟HPFL加固RC板的承载力是准确可行的,且2块加固试验板的模拟结果与理论计算结果吻合也较好,验证了理论计算的可靠性。

参考文献:

- [1] 尚守平, 罗杰, 余德军. 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固RC受剪梁的高温性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(4): 102-107.
Shang Shouping, Luo Jie, Yu Dejun. Experimental Study of High-Temperature Behavior of RC Shear Beam Retrofitted with High-Performance Ferrocement Laminate[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(4): 102-107.
- [2] 尚守平, 蒋隆敏, 张毛心. 钢筋网水泥复合砂浆加固RC偏心受压柱的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 18-25.
Shang Shouping, Jiang Longmin, Zhang Maoxin. Experimental Investigation into the Strengthening of Eccentric Compression RC Column Using Composite Mortar Laminate Reinforced with Mesh Reinforcement[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 18-25.
- [3] 蒋隆敏, 尚守平, 曹晖. HPFL二次受力加固RC偏压柱试验研究[J]. 合肥工业大学学报, 2010, 33(6): 868-872.
Jiang Longmin, Shang Shouping, Cao Hui. Experimental Investigation into the Strengthening of Eccentrically Compressed RC Column Using HPFL Under Twice Loading [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2010, 33(6): 868-872.
- [4] 尚守平, 姜巍. HPFL条带加固眠墙抗剪试验研究[J]. 震灾防御技术, 2011, 6(3): 231-241.
Shang Shouping, Jiang Wei. Research on Shear Strength of HPFL Reinforced Solid Wall[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2011, 6(3): 231-241.
- [5] 蒋隆敏, 尚守平, 黄政宇. 一种适用于钢丝(筋)网水泥加固RC结构的纤维增强复合砂浆和界面剂[J]. 土木工程学报, 2005, 38(5): 41-47.
Jiang Longmin, Shang Shouping, Huang Zhengyu. Fiber Reinforced Composite Mortar and Interfacial Adhesive for Strengthening of RC Structures with Ferro Cement[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5): 41-47.
- [6] 湖南大学. CECS 242—2008 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008: 14-48.
Hunan University. CECS 242—2008 Technical Specification for Concrete Structures Strengthened with HPFL[S]. Beijing: China Planning Press, 2008: 14-48.
- [7] 尚守平. 高性能水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构设计施工指南[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2008: 43-48.
Shang Shouping. Design and Construction Guidelines of Strengthening Concrete Structures with HPFL[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008: 43-48.
- [8] 张继文, 吕志涛, 滕锦光, 等. 外贴CFRP或钢条带加固混凝土双向板的受力性能及承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2001, 22(4): 42-48.
Zhang Jiwen, Lü Zhitao, Teng Jinguang, et al. Study on the Behavior and Strength of the Two-Way Slabs Bonded with CFRP or Steel Strips[J]. Journal of Building Structures, 2001, 22(4): 42-48.
- [9] 沈蒲生. 混凝土结构设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 53-54.
Shen Pusheng. Concrete Structure Design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 53-54.
- [10] 沈蒲生. 混凝土结构设计原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 71-72.
Shen Pusheng. Concrete Structure Design Principle[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 71-72.
- [11] 何爱波, 蒋隆敏, 黄艳. HPFL加固混凝土板柱结构的有限元模拟分析[J]. 湖南工业大学学报, 2014, 28(5): 10-16.
He Aibo, Jiang Longmin, Huang Yan. The Finite Element Simulation Analysis of HPFL Reinforced Concrete Slab-Column Structure[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2014, 28(5): 10-16.

(责任编辑: 邓光辉)