

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2014.05.003

# HPFL 加固混凝土板柱结构的有限元模拟分析

何爱波, 蒋隆敏, 黄 艳

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 通过高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层 (HPFL) 加固法对 5 个不同钢筋网布置方式加固后的板柱构件的力学性能进行了有限元模拟分析。分析结果表明, 经不同方案加固后的板柱构件的承载力和跨中板带刚度都有了不同程度的提高, 且随着加固层钢筋网布置方式 (田字形、井字形、十字形) 的不同, 加固后的构件呈现出不同的加固效果和受力性能; 在原构件抗冲切能力足够强的前提下, 十字形加固方式为加固效果最好的抗弯加固方式, 田字形加固方式其次。

**关键词:** 高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层; 加固; 板柱结构; 有限元; 破坏形态

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2014)05-0010-07

## The Finite Element Simulation Analysis of HPFL Reinforced Concrete Slab-Column Structure

He Aibo, Jiang Longmin, Huang Yan

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

**Abstract:** Made a finite element analysis on mechanical properties of five reinforced slab-column members of different steel mesh arrangements through high performance ferrocement laminate (HPFL) reinforcement method. The analysis shows that the bearing capacity of reinforced slab columns and rigidity of midspan slab band are improved differently by the schemes, and with the different layout types ('田' type, '井' type and cross type) of steel mesh in reinforced layers, the reinforced members appear the different reinforcement effects and mechanical behaviors. On the condition of the punching shear resistance of original columns strong enough, the cross-type reinforcement is the best bending resistance reinforcement pattern and the '田' type reinforcement is the second.

**Keywords:** high performance ferrocement laminate (HPFL); reinforcement; slab-column structure; finite element failure mode

## 0 引言

高性能水泥复合砂浆钢筋网薄层 (high performance ferrocement laminate, HPFL) 加固法, 是一种以新型的无机复合材料为基材、以钢筋网为增强材料的薄壁型加固方法。由于 HPFL 具有抗老化、耐久性能好, 不会显著增大构件的质量与截面尺寸, 且

防火性能和耐高温性能好等优点<sup>[1]</sup>, 加上其加固方式较为灵活, 因而在结构加固工程中具有广泛的应用前景。

板柱结构又称为无梁楼盖结构, 它是一种被广泛采用的建筑结构形式, 可以分为有柱帽无梁楼盖、无柱帽无梁楼盖、板梁式无梁楼盖、密肋式无梁楼

收稿日期: 2014-04-20

作者简介: 何爱波 (1988-), 男, 湖南永州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新型材料及其在结构加固中的应用,

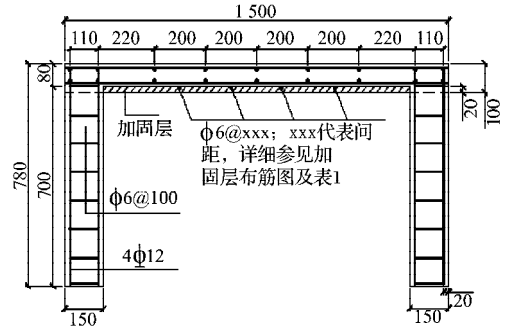
E-mail: hlwz2014@qq.com

盖4种类型<sup>[2]</sup>。板柱结构的优点是: 1) 其结构体系简单, 传力途径短捷, 建筑层间高度较肋梁楼盖小, 因此可以减小房屋的体积和墙体结构; 2) 其天棚平整, 可以大大改善采光、通风和卫生条件, 并可节省模板, 简化施工。已有文献表明, 一般情况下, 当楼面荷载为5 kN/m<sup>2</sup>以上、跨度为6 m以内时, 无梁楼盖较肋梁楼盖经济<sup>[2]</sup>。因此, 无梁楼盖常被用于多层厂房、仓库、商场等建筑结构中<sup>[2]</sup>。

由于无梁楼盖的设计方法并不完善, 当结构受到火灾、需要延长其使用寿命或改造升级等而需要进行加固时, 会面临诸多的困难。因此, 本文拟采用数值模拟方法, 对无柱帽无梁楼盖以HPFL加固后的板柱构件的力学性能进行分析。通过有限元模拟分析, 研究无柱帽无梁楼盖在HPFL加固后, 其板抗弯承载力、刚度、破坏形态等特征的改善情况, 以期为实际工程中板柱结构的加固设计提供行之有效的参考依据。

### 1 试件材料及方案概况

1) 试验模型。本研究中, 选用板柱结构中间区格中的一个单元为试验模型, 其整体尺寸为1 500 mm × 1 500 mm × 780 mm, 其中, 板厚为80 mm, 柱子尺寸为150 mm × 150 mm × 700 mm。试验模型原构件的具体尺寸和配筋情况如图1所示, 本文图中尺寸单位均为mm, 图中从略。



c) 加固后构件1-1剖面图

图1 原构件及加固后构件的截面尺寸和配筋

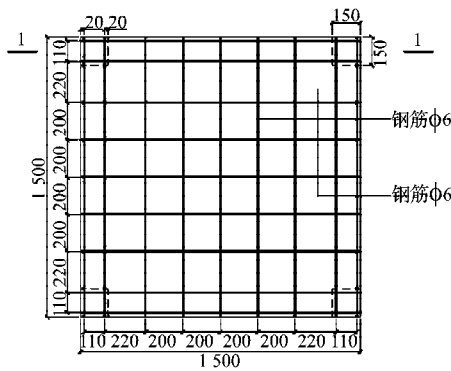
Fig. 1 Section size and reinforcement of original member and the strengthened member

2) HPFL加固混凝土。混凝土设计强度等级选用C30。板的受力筋根据GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[3]</sup>(以下简称“规范”)选用HPB300, 直径为Φ6的钢筋, 其屈服强度为300 MPa, 并且按双层双向结构布置。柱的纵向钢筋根据规范选用HRB335(屈服强度为335 MPa), 每根柱子均按4Φ12配置; 柱的箍筋根据规范选用HPB300(屈服强度为300 MPa), 并按Φ6@100配置。加固层厚度为20 mm, 加固层中的钢筋网选用HPB300(屈服强度为300 MPa), 直径为Φ6的钢筋。加固层中所使用的复合砂浆, 其设计强度等级按《水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土结构技术规程》<sup>[4]</sup>中的要求, 选用M40。具体的HPFL加固混凝土设计方案见表1。各设计方案具体的加固层钢筋配筋图如图2所示。

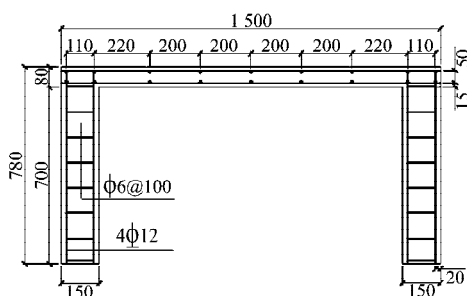
表1 设计参数及方案

Table 1 Design parameters and schemes

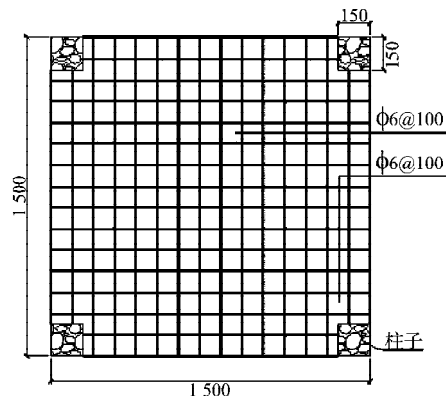
编号	加固层主要纵向配筋	加固层主要横向配筋	加固层体积配筋率/%	加固层网筋形状	备注
BZ1					未加固对比构件
BZ2	16Φ6@100	16Φ6@100	2.983 0	田字形	先加固后加载, 加固层
BZ3	11Φ6@150	11Φ6@150	2.080 3	田字形	详细配筋图
BZ4	9Φ6@50	9Φ6@50	2.080 3	十字形	参见图
BZ5	3Φ6@200	3Φ6@200	0.902 8	十字形	
BZ6	8Φ6@50	8Φ6@50	1.962 5	井字形	2a-d。



a) 原构件板配筋图



b) 原构件1-1剖面图



a) BZ2

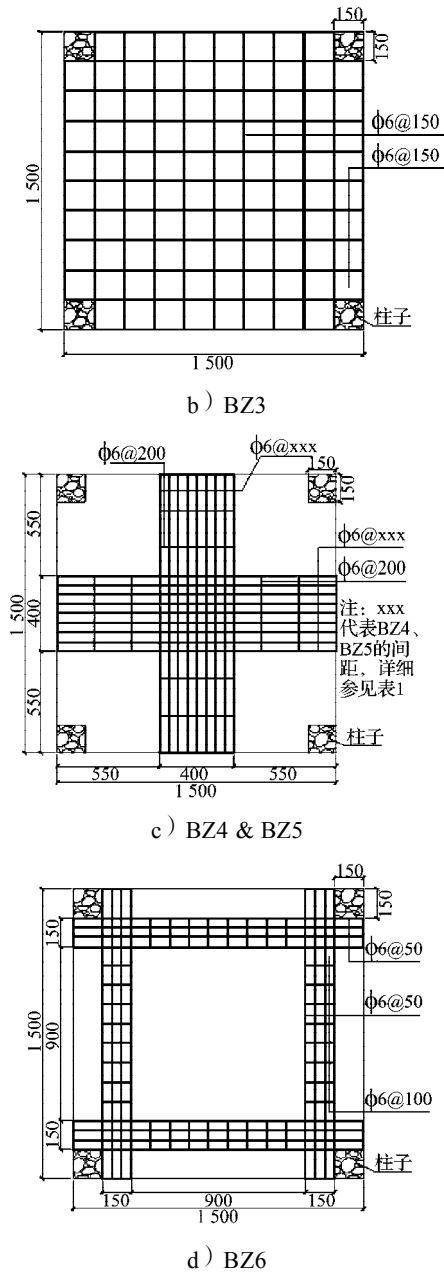


图2 各方案加固层钢筋配筋图

Fig. 2 The reinforcement diagram of steel bar for each scheme

## 2 有限元分析概况

### 2.1 单元选取

混凝土和复合砂浆采用SOLID65单元,该单元可以模拟混凝土开裂、压碎、塑性变形及徐变,能进行材料的非线性处理。钢筋均采用beam188单元,因为beam188单元的每个节点有6个自由度,比solid65单元的每个节点多3个,可以保证其周围混凝土开裂或压碎时,solid65仍然能对beam188的节点提供足够的约束,从而有效地模拟钢筋和混凝土之间粘结滑移的力学作用<sup>[5]</sup>。

### 2.2 材料本构关系

混凝土和复合砂浆本构关系的上升段采用规范规定的公式,下降段则采用Hongnestad的处理方法,具体如下:

当 $\epsilon_c \leq \epsilon_0$ 时:

$$\sigma_c = f_c \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^n \right]; \quad (1)$$

当 $\epsilon_0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}$ 时:

$$\sigma_c = f_c \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{\epsilon_c - \epsilon_0}{\epsilon_{cu} - \epsilon_0} \right) \right]. \quad (2)$$

式(1)和(2)中: $\sigma_c$ 为对应于混凝土压应变为 $\epsilon_c$ 时的混凝土压应力; $\epsilon_0$ 为对应于混凝土压应力刚达到 $f_c$ 时的混凝土压应变; $\epsilon_{cu}$ 为正截面处于非均匀受压时混凝土的极限压应变; $f_c$ 为混凝土立方体抗压强度设计值; $n$ 为系数。

按照规范规定与计算,其中 $n=2, \epsilon_0=0.002, \epsilon_{cu}=0.0033$ ,钢筋基本处于单轴受力状态,其本构关系可以采用理想弹塑性模型<sup>[3]</sup>。

### 2.3 模型建立

通常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种方式<sup>[6]</sup>。由于分离式能获得较多的数据分析等优点,因此本文选用分离式方式建模,原构件的有限元模型如图3所示。

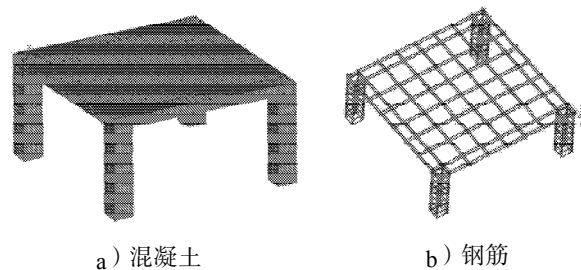


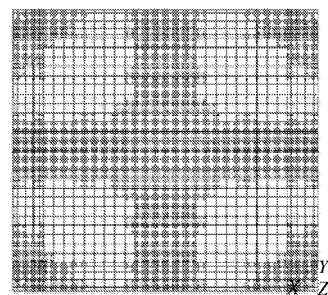
图3 原构件有限元模型图

Fig. 3 Finite element model of original member

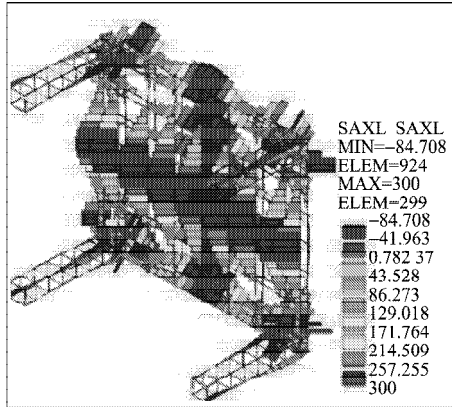
## 3 有限元结果分析

### 3.1 未加固构件模拟结果分析

未加固构件的有限元模拟结果如图4所示。



a) 裂缝图



b) 钢筋轴应力图

图4 原构件的有限元模拟裂缝图和钢筋轴应力图

Fig. 4 Finite element simulation crack pattern and axial stress of original member

由图4所示未加固构件的有限元模拟结果可以得知,当荷载加载到26.6 kN时,板跨中第一次出现了裂缝,其形状呈十字形(如图4a所示);而从图4b所示未加固构件达到其极限承载力(61.81 kN)时钢筋的轴应力图中可以看出,在该荷载下,板跨中间的钢筋已经屈服,这一结果说明,未加固构件呈现的是弯曲破坏,结构具有较好的延性。

### 3.2 承载力与破坏形态

本研究中,有限元模拟的各构件的极限承载力情况如表2所示。

表2 计算极限承载力

Table 2 Ultimate bearing capacity calculation

编号	计算极限承载力/kN	加固后承载力提高率/%	加固层体积配筋率/%	贡献值
BZ1	61.81			
BZ2	122.40	98.03	2.983 0	32.86
BZ3	107.91	74.58	2.080 3	35.85
BZ4	102.40	65.67	2.080 3	31.57
BZ5	92.19	49.15	0.902 8	54.44
BZ6	101.02	63.44	1.962 5	32.33

注:贡献值为单位加固层体积配筋率对加固后承载力提高值的贡献。

分析表2中的数据可以得出,相较于未进行加固的构件,加固后的构件的极限承载力提高了63.44%~98.03%,这表明加固后各构件的承载力提高量均较大,加固效果明显。

各设计方案中,BZ2的加固层体积配筋率最高,所以加固效果最明显,BZ2比BZ3和BZ4的加固层体积配筋率要多0.9027%,而其相对于未加固构件的极限承载力提高率却要比BZ3和BZ4分别多23.45%和32.36%;BZ2比BZ5的加固层体积配筋率多了2.08%,而其相对于未加固构件的极限承载力要比BZ5多48.88%,BZ2比BZ6的加固层体积配筋率多1.0205%,

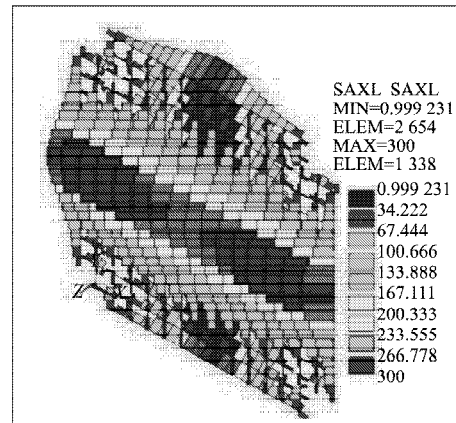
而其相对于未加固构件的极限承载力要比BZ5多34.59%。

BZ3与BZ4的加固层体积配筋率一样大,但是两者因为加固方式不同(BZ3的网筋形状为田字形,BZ4的网筋形状为十字形),其极限承载力也不同,相较于未加固构件的极限承载力,两者的提高率相差8.91%,相差程度不大。BZ3和BZ4比BZ5的加固层体积配筋率多1.1175%,两者相对于未加固构件的极限承载力要比BZ5分别多25.43%和16.52%;BZ3和BZ4比BZ6的加固层体积配筋率要多0.1178%,而两者相对于未加固构件的极限承载力要比BZ6多11.14%和2.23%。

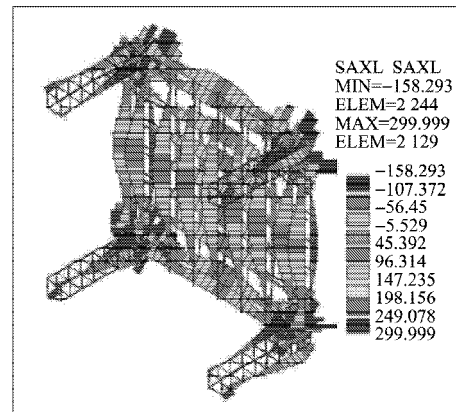
BZ6比BZ5的加固层体积配筋率多1.0597%,而其相对于未加固构件的极限承载力要比BZ5多14.29%。

以上分析结果说明,加固层体积配筋率对加固效果有较大的影响。

图5~9所示为加固后各构件达到其极限承载力时,板柱钢筋和加固层钢筋网的轴应力图,单位均为MPa。



a) 加固层钢筋



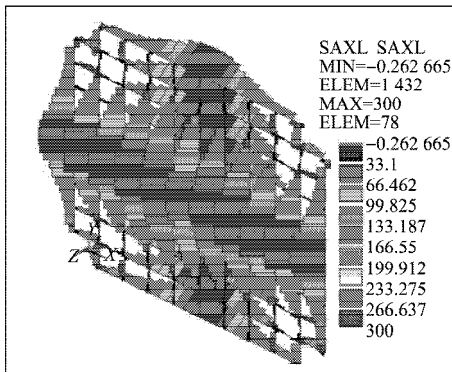
b) 板柱钢筋

图5 BZ2钢筋轴应力图

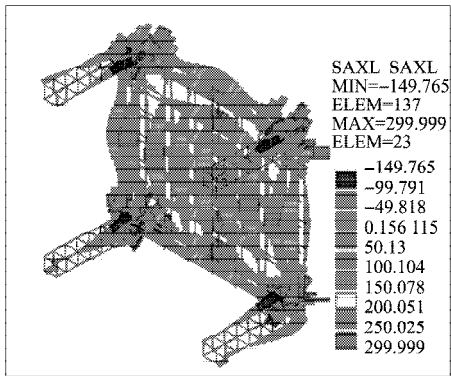
Fig. 5 The axial stress diagram of BZ2

从前面的分析得知,未加固构件呈现的是弯曲破坏,加固后由于配筋率和加固层网筋形状的不同,加固后的构件呈现出不同的加固效果。

从图5所示轴应力图可以得知,当BZ2达到其极限承载力时,BZ2加固层网筋跨中的钢筋已经屈服,板柱节点处的钢筋也已经基本屈服,这说明加固后构件的破坏形态仍然呈现为弯曲破坏。但是,由于此时板柱跨中的钢筋并未屈服(其钢筋应力为249 MPa),说明其加固层钢筋配筋率偏高,导致加固后构件的承载力提高显著,但却降低了加固后整体构件的延性。



a) 加固层钢筋



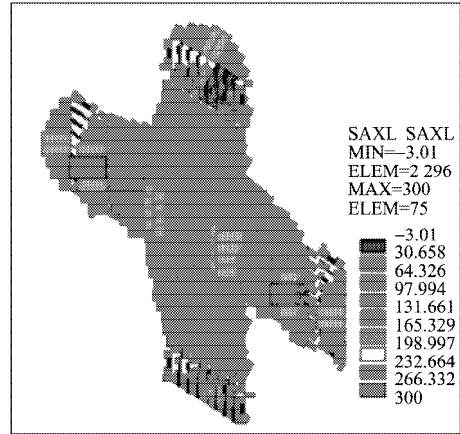
b) 板柱钢筋

图6 BZ3钢筋轴应力图

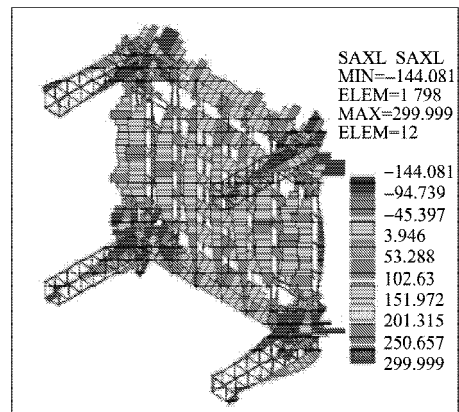
Fig. 6 The axial stress diagram of BZ3

由图6可知,当BZ3达到其极限承载力时,BZ3加固层网筋跨中的钢筋已经屈服,板柱跨中的钢筋和其节点处的钢筋也都已经基本屈服,这说明加固后构件的破坏形态呈现为弯曲破坏。对比图5和图6可知,虽然BZ3板柱跨中的钢筋只有部分屈服,但是其延性要比BZ2好。

BZ4(加固层网筋形状为十字形)是针对原构件的裂缝产生特点和破坏形式而设计的加固方式,并根据BZ3加固后的效果,采用了与BZ3一样的体积配筋率,其加固后的受力情况如图7所示。



a) 加固层钢筋



b) 板柱钢筋

图7 BZ4钢筋轴应力图

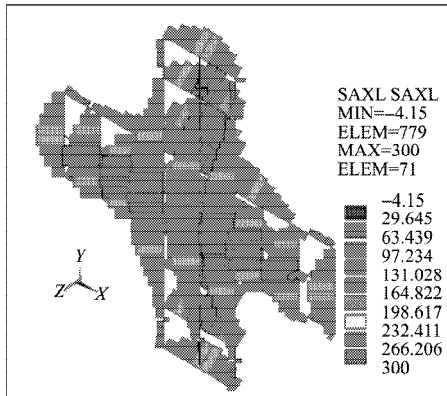
Fig. 7 The axial stress diagram of BZ4

从图7所示方案BZ4加固后的受力情况可知,当BZ4达到其极限承载力时,BZ4加固层的钢筋和板柱跨中的钢筋基本没有屈服,而板柱节点处的钢筋却已经屈服,说明加固后构件的破坏形态呈现的是冲切破坏。导致冲切破坏的原因可能是原构件的抗冲切能力没有比其抗弯能力强很多,导致加固后构件的抗弯能力提高太多,抗冲切能力却没有相应地提高,于是产生了冲切破坏,对其抗弯加固效果也不能充分体现出来。以上结果说明,该配筋率对于原构件采用十字形这种加固方式是偏高的,同时也说明没有为其配置合适的配筋率。

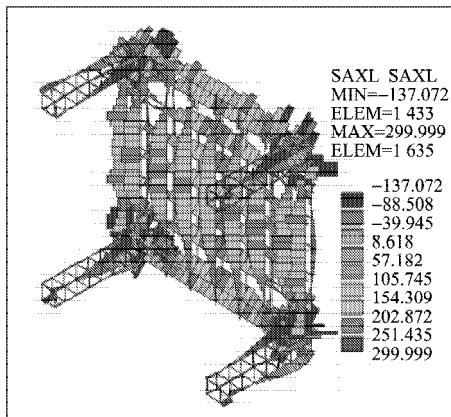
图6与图7所示应力结果图表明:相同的体积配筋率,因加固方式的不同,对同一个构件会产生不同的破坏形态。因此,对于不同的加固方式,需要根据原构件的受力情况来合理地配置其配筋率。

针对方案BZ4中配筋率过高造成的冲切破坏情况,设置了方案BZ5,该方案降低了十字形加固方式的配筋率,方案BZ4加固后的受力情况如图8所示。从图8所示受力情况中可知,当BZ5达到其极限承载力时,BZ5加固层的钢筋已经屈服、板柱节点处的钢

筋也已经基本屈服, 说明加固后构件的破坏形态呈现的是弯曲破坏。然而此时板柱跨中的钢筋并未屈服(其钢筋应力为 251 MPa), 表明加固层的配筋率还是稍微偏高。如果继续降低加固层的配筋率, 则构件加固后的承载力也会降低, 达不到应有的要求; 若继续提高加固层的配筋率, 就会出现像 BZ4 一样的脆性破坏, 因此, 这种加固方式会受到原构件自身抗冲切能力的限制。



a) 加固层钢筋



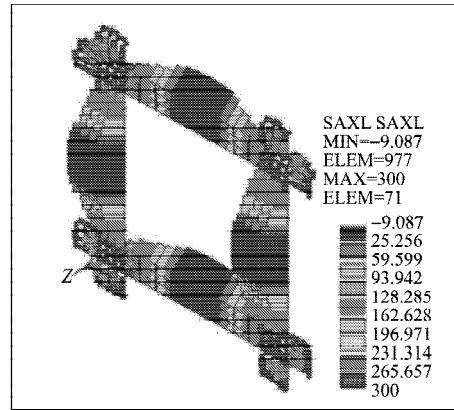
b) 板柱钢筋

图8 BZ5钢筋轴应力图

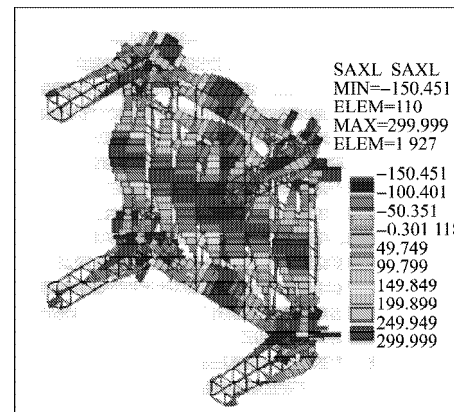
Fig. 8 The axial stress diagram of BZ5

当原构件本身的抗冲切能力足够强时, 十字形加固方式会是一种较为理想的抗弯加固方式, 因为从表2中可以得知, 它的加固层钢筋的体积配筋率贡献值(值越高越好)是最高的, 表明在这种加固方式下, 它的体积配筋率得到了充分的发挥, 加固层钢筋得到了很好的利用。从另一个角度来说, 即采用相对于其他加固方式较少的钢筋, 就能体现出较好的加固效果; 在抗弯承载力提高显著的同时, 钢筋也得到了比较充分的利用, 且钢筋用量少, 能降低加固维修的费用; 若原结构本身的抗冲切能力没有比抗弯能力足够强, 这种加固方式就会出现“头痛医头, 脚痛医脚”的现象, 从而达不到所要求的抗弯加固效果。

通过对前面几种加固方式的分析, 并结合原构件的受力特性, 为了能使加固后的构件既具有良好的延性, 又能节约钢筋用量、同时避免出现十字形加固方式的局限性, 故设计了井字形加固方式, 即方案 BZ6, 该方案下的受力情况如图9所示。



a) 加固层钢筋



b) 板柱钢筋

图9 BZ6钢筋轴应力图

Fig. 9 The axial stress diagram of BZ6

从图9可知, 当BZ6达到其极限承载力时, BZ6加固层的钢筋已经屈服, 板柱跨中的钢筋和其节点处的钢筋也基本屈服, 说明加固后构件的破坏形态呈现的是弯曲破坏。从图9中还可以看出, BZ6的加固层钢筋和板柱自身的钢筋都得到了较好的利用, 也能够反映出其相对较好的延性, 且在加固后其承载力也提高了63.44%, 提高效果显著。因此, 综合上述情况, 说明方案BZ6(加固层网筋形状为井字形)这种加固方式对于本试验模型来说, 是一种比较合理的抗弯加固方式, 而如果采用抗冲切能力足够强的试验模型, 则十字形网筋和田字形网筋的抗弯加固效果要比井字形网筋的好。

从以上的分析结果可以得出:

第一, 加固层体积配筋率越高, 加固后构件的极限抗弯承载力提高越明显, 但加固后的构件的延性会变差;

第二,相同的加固层体积配筋率,由于加固方式的不同,在原构件抗冲切能力不够强的情况下,会导致加固后的构件呈现出不同的破坏形态;

第三,田字形网筋和井字形网筋的加固方式既加固了板柱结构的跨中板带,又兼顾到了板柱结构的柱上板带,是对构件加固后整体性能的提高;而十字形网筋加固方式只是局部性地针对了板柱结构的跨中板带,对于原结构自身抗冲切能力不足够强大时,会存在一定的局限性;但如果原构件抗冲切能力足够强大的前提下,BZ4(十字形网筋)这种加固方式应该会是最好的抗弯加固方式。

### 3.3 荷载-挠度曲线

图10所示为各构件的荷载-挠度曲线图。

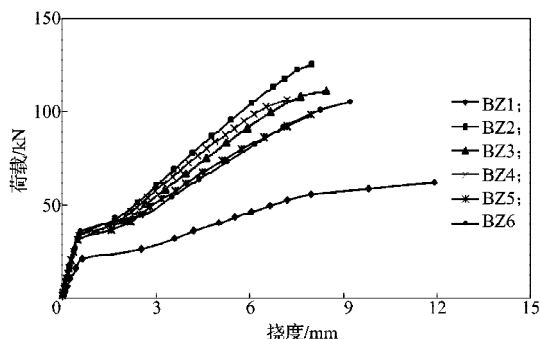


图10 荷载-挠度曲线

Fig. 10 Load-deflection curves

从图10可看出,加固后构件的承载力比未加固构件的承载力明显提高。此外,从图中还能得知,加固后构件的挠度要比未加固构件的挠度明显减小,说明加固后构件的刚度有了不同程度的提高。

## 4 结论

通过以HPFL加固法对混凝土板柱结构的有限元模拟分析,可以得出以下结论:

1) 从有限元模拟结果得知,经各方案加固后的构件的承载力和刚度均比未加固构件的有了不同程度的提高;

2) 加固层的体积配筋率对加固效果影响明显,配筋率越高,加固后的构件抗弯承载力提高越显著,但加固后构件的延性会相对变差,如果加固后构件的抗冲切能力没有随之提高,可能会出现脆性破坏(冲切破坏);

3) 各种加固方式都有其各自的特点,如何选取比较合理的加固方式,需要根据结构自身的受力特性来分析选取,而合理的加固方式,既能保证结构加固后的效果,又能节省费用;

4) 如果原构件的抗冲切能力足够强,对于板中抗弯承载力的提高,选用十字形加固层网筋应该是最为好的,其次是田字形网筋,最后是井字形。

通过对以上几种加固方式分析得出的结论,可为实际工程的加固设计提供参考,但是所得出的这些研究结果还需要进行进一步的试验验证。

### 参考文献:

- [1] 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, 33.  
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, 33.
- [2] 沈蒲生. 混凝土结构设计原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007: 66-68.  
Shen Pusheng. Concrete Structure Design Principle[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007: 66-68.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 19-208.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China. GB 50010—2010 Code for Concrete Structure Design[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011: 19-208.
- [4] 湖南大学. CECS 242: 2008 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: 11-12.  
Hunan University. CECS 242: 2008 Technical Specification for Strengthening Concrete Structures with Grid Rebar and Mortar[S]. Beijing: China Planning Press, 2008: 11-12.
- [5] 于洁,陈玲俐,许诺. 不同破坏模式的钢筋混凝土框架节点动力性能比较[J]. 上海大学学报: 自然科学版, 2011, 17(5): 669-674.  
Yu Jie, Chen Lingli, Xu Nuo. Comparison of Dynamic Performance of Reinforced Concrete Frame Joint with Different Failure Modes[J]. Journal of Shanghai University: Natural Science Edition, 2011, 17(5): 669-674.
- [6] 王新敏. ansys 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007: 479-485.  
Wang Xinmin. Ansys Engineering Structure Numerical Analysis[M]. Beijing: China Communications Press, 2007: 479-485.

(责任编辑: 廖友媛)