

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.06.003

# 板柱节点抗冲切碳纤维加固非线性有限元分析

杨志青, 杨晓华, 陈 藤, 刘 星, 盛廷国

(湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 针对钢筋混凝土及加固材料的非线性性, 采用非线性有限元法分析板柱节点抗冲切承载问题。用碳纤维对板柱节点进行加固, 对比分析加固前后板柱节点抗冲切承载能力可知, 该加固方法能有效提高板柱节点抗冲切承载能力。

**关键词:** 板柱结构; 板柱节点; 碳纤维加固; 冲切破坏

**中图分类号:** TU375.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2013)06-0012-06

## Study on Punching Resistance of Carbon Fiber Reinforced Slab-Column Nodes by Nonlinear Finite Element Method

Yang Zhiqing, Yang Xiaohua, Chen Ten, Liu Xing, Sheng Tingguo

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

**Abstract:** For reinforced concrete and reinforcement material nonlinearity, the punching shear problem of slab-column node is analyzed by nonlinear finite element method. The slab-column nodes are enforced by CFRP material. The punching shear bearing capacities for slab-column nodes before and after the enforcement are compared. The results show that the CFRP reinforcement can effectively improve the slab-column node cutting resistance bearing capacity.

**Keywords:** slab-column structure; slab-column node; carbon fiber reinforcement; punching shear failure

## 0 引言

板柱结构是由楼板和柱组成承重体系的房屋结构, 其特点是室内楼板下没有梁, 空间通畅简洁, 平面布置灵活, 能降低建筑物层高。板柱结构适用于大空间的多层厂房、仓库和公共建筑, 也可用于办公楼和住宅建筑等。在一般情况下, 板柱结构节点要承受板传来的较大荷载作用, 冲切效应在板柱节点尤为明显。因此, 进行板柱结构设计时, 需要对板柱进行冲切破坏验算。对大多数板柱结构, 当钢筋混凝土板发生冲切破坏时, 板的抗弯承载能力并

未充分发挥。由于冲切破坏机理的复杂性, 迄今为止没有一个使用方便计算结果又较准确的计算公式。国内外许多学者<sup>[1-3]</sup>对现浇混凝土板的冲切效应进行了大量试验和理论研究, 并提出了许多有意义的分析方法和计算公式。在工程实际中, 由于多种原因需要对既有建筑进行维修和加固改造, 其中碳纤维(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)是目前应用较广泛的加固材料之一。CFRP加固钢筋混凝土结构具有高效、快捷、简便、耐久性好且不改变原结构尺寸等优点。采用CFRP对板柱节点进行加固后, 造成板柱节点处应力状态更复杂, 从而使板柱节点加

收稿日期: 2013-10-10

作者简介: 杨志青(1984-), 男, 江西上饶人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为混凝土结构,

E-mail: yangzhiqing8410@126.com

通信作者: 杨晓华(1963-), 男, 湖南岳阳人, 湖南工业大学教授, 主要从事混凝土结构及结构计算方法方面的研究,

E-mail: yangsheep@126.com

固计算变得更困难。随着计算机技术的发展,可用有限元方法来模拟钢筋混凝土结构加固<sup>[3-9]</sup>。

本文采用 ANSYS 有限元结构分析软件,分别对未加固和用 CFRP 加固后的板柱节点冲切破坏过程进行仿真,并将仿真结果进行对比分析,从而研究采用 CFRP 加固现浇混凝土板柱节点的抗冲切性能。

## 1 非线性有限元分析

### 1.1 钢筋混凝土结构有限元模型

钢筋混凝土结构有限元分析模型主要有分离式、整体式和组合式 3 种。分离式模型是将混凝土材料和钢筋作为不同的单元来处理,即混凝土材料和钢筋材料可以各自被划分为足够小的单元。在分离式模型中,钢筋和混凝土之间可以使用联结单元来模拟钢筋和混凝土之间的粘结和滑移。若钢筋与混凝土之间的粘结很好,不会有相对滑移,可视为刚性联结,这时可不用联结单元。整体式模型是将钢筋分布于整个单元中,并把单元视为连续均匀材料。与分离式不同之处是综合了混凝土和钢筋对单元刚度的贡献,这一点与组合式模型有些相同。组合式模型认为混凝土与钢筋单元之间粘结较好,认为两者无相对滑动。在组合式模型中,分别建立混凝土单元与钢筋单元,使 2 种单元在节点进行耦合,由此确定模型的刚度。本文中,钢筋混凝土结构有限元分析模型选用分离式模型,即分别建立混凝土单元和钢筋单元。

### 1.2 计算模型

模型的实际结构为双向等跨多区格的现浇混凝土板柱结构。为计算方便,选取中间一个区格结构,建立 1/4 缩尺比例的有限元计算模型。模型的楼板尺寸为 1 500 mm × 1 500 mm,板厚 100 mm。楼板四角设置框架柱,柱截面尺寸为 150 mm × 150 mm。楼板配筋采用双层双向配筋,板上下配筋均为 C8@120,钢筋保护层厚度为 15 mm。板四角框架柱配筋为 4C12,箍筋为 A6@100,钢筋保护层厚度为 20 mm。整个板柱结构混凝土强度等级为 C25。碳纤维加固粘贴长度:板面为 360 mm 并向柱脚延伸 200 mm。

在板柱结构有限元计算模型中,现浇混凝土部分采用 solid65 单元<sup>[8]</sup>进行划分;钢筋部分采用 beam188 单元<sup>[7]</sup>进行划分。分析中假定钢筋与混凝土紧密锚固,无相对滑移。板柱节点加固材料碳纤维布选用 shell41 单元<sup>[4-5]</sup>进行划分。碳纤维布加固模型采用如下假定:

1) 碳纤维布与混凝土粘结良好,无相对滑移;

2) 受力过程中,CFRP 布应变与混凝土应变相互变形协调。

建立的有限元分析模型如图 1 所示。

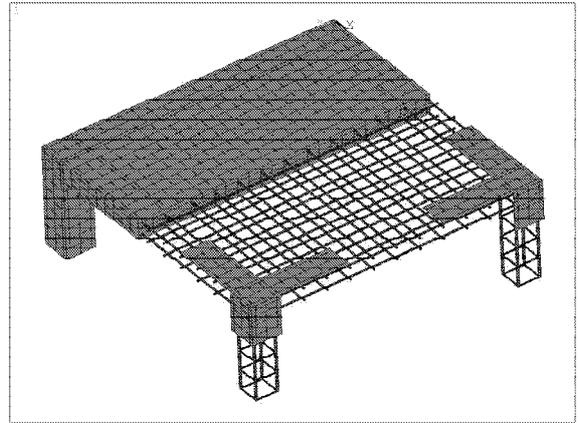


图1 有限元分析模型

Fig. 1 The finite element analytical model

### 1.3 材料参数

在 solid65 单元中,混凝土材料的破坏准则与本构关系可分别设置。选用 W-W 五参数破坏准则用于判定混凝土材料的开裂和压碎状态。混凝土材料的本构关系参照 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[10]</sup>提供的公式,轴心受压应力-应变关系的数学表达式为:

$$\sigma_c = f_c \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n \right], \varepsilon_c \leq \varepsilon_0; \quad (1)$$

$$\sigma_c = f_c, \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}; \quad (2)$$

$$n = 2 - \frac{1}{60} (f_{cu,k} - 50)。 \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $\varepsilon_c$ 为压应变;

$\sigma_c$ 是压应变为 $\varepsilon_c$ 时的应力;

$f_c$ 为混凝土轴心抗压强度;

$\varepsilon_0$ 为压应力达到 $f_c$ 时混凝土的应变值,当其计算值小于 0.002 时, $\varepsilon_0$ 取值 0.002;

$n$ 为系数,当其计算值大于 2.0 时,取值 2.0;

$\varepsilon_{cu}$ 为混凝土的极限压应变,当其计算值大于 0.003 3 时,取值 0.003 3;

$f_{cu,k}$ 为混凝土立方抗压强度标准值。

混凝土材料的强化准则选多线性随动强度模型。

钢筋看作理想弹塑性材料,应力-应变关系数学表达式为:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s, \varepsilon_s \leq \varepsilon_y; \quad (4)$$

$$\sigma_s = f_y, \varepsilon_s > \varepsilon_y。 \quad (5)$$

式(4)~(5)中: $\sigma_s$ 是钢筋应变为 $\varepsilon_s$ 时的拉应力;

$E_s$ 为钢筋弹性模量;

$\varepsilon_y$  为钢筋屈服时的应变;

$f_y$  为钢筋屈服时的应力。

钢筋材料强化准则选用双线性等向强化模型。

碳纤维布材料参数: 弹性模量为  $2.1 \times 10^5$  MPa, 抗拉强度为  $3.0 \times 10^3$  MPa。

## 2 结果及分析

有限元计算模型建立后, 分别对未加固和采用碳纤维布加固的有限元计算模型施加板面均布荷载。荷载采用单调加载方式, 按事先设计好的荷载步不断增加板面均布荷载, 2 种计算模型的每级荷载步荷载的增量完全相同。施加初始荷载为  $0 \text{ kN/m}^2$ , 每级荷载增量为  $10 \text{ kN/m}^2$ , 至板柱节点冲切破坏。未加固有限元计算模型, 施加的最大荷载为  $14 \text{ kN/m}^2$ ; 碳纤维布加固的有限元计算模型, 施加的最大荷载为  $24.6 \text{ kN/m}^2$ 。有限元分析模型应力计算结果采用云图方式进行表达, 云图方式显示结果比较直观, 能清晰地反映板柱节点从加载到破坏全程应力分布的变化情况, 还能直观地反映混凝土材料开裂及裂缝的发展情况。

### 2.1 未加固板柱节点的冲切破坏

现浇混凝土板柱节点在开裂前的应力云图如图 2 所示, 开裂后的应力云图如图 3 所示, 板柱节点冲切破坏后的应力云图如图 4 所示。现浇混凝土板柱结构开裂后, 在板柱节点附近裂缝分布如图 5 所示, 板柱节点发生冲切破坏后裂缝分布情况如图 6 所示。

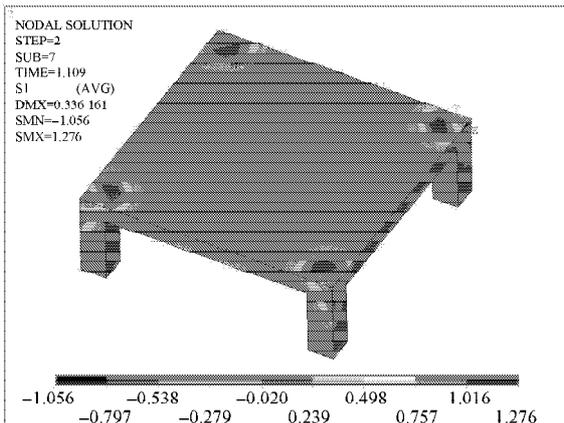


图2 开裂前板柱节点主应力云图

Fig. 2 The principal stress nephogram of slab-column node before cracking

从图 2 可以看出, 现浇混凝土板柱结构在开裂前, 板柱节点附近的柱顶板面出现最大拉应力, 约为  $1.276 \text{ MPa}$ ; 并在板柱节点周围形成一个冲切区域, 冲切区域成斜锥型, 应力沿板厚方向分布非常明显, 应力梯度变化较大。

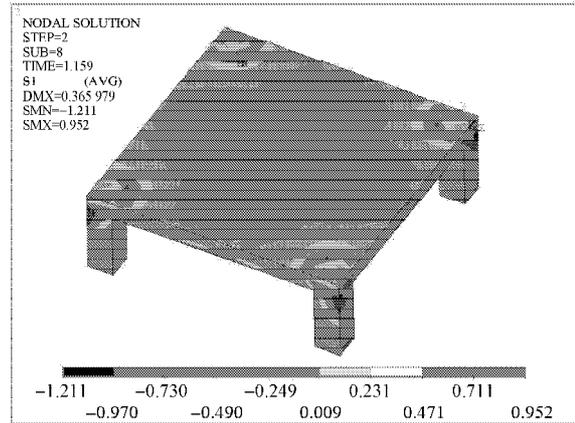


图3 开裂后板柱节点主应力云图

Fig. 3 The principal stress nephogram of slab-column node after cracking

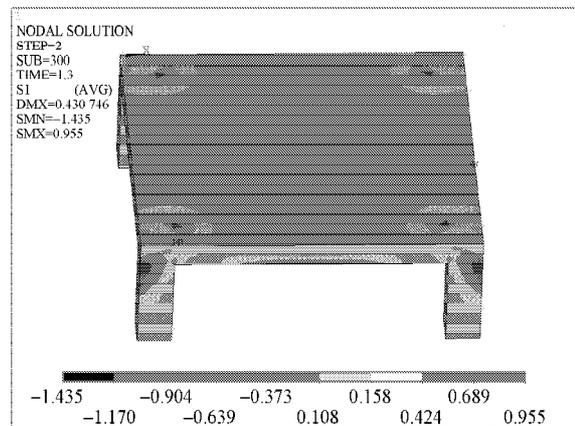


图4 破坏后板柱节点主应力云图

Fig. 4 The principal stress nephogram of slab-column node after damage

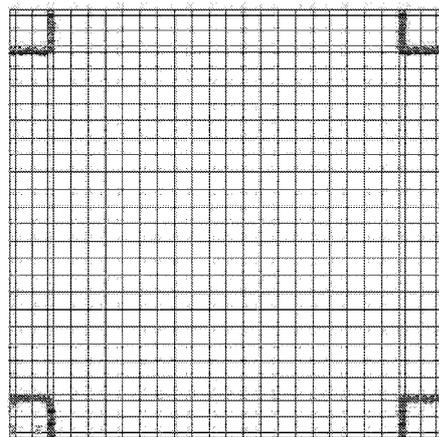


图5 开裂后板柱节点裂缝分布

Fig. 5 Cracking distribution near slab-column nodes after cracking

从图 3 和图 5 可以看出, 随着荷载继续增加, 在板柱节点附近板顶受拉区出现冲切裂缝, 裂缝沿柱周边分布, 裂缝出现的区域与柱子尺寸几乎相当。随着裂缝产生, 冲切区域应力得到释放, 最大应力有

所降低,冲切区域由柱角向板内扩散发展。随着荷载进一步增加,板柱节点附近板顶的冲切裂缝不断扩展并相继产生新的受拉裂缝,冲切区域发展到一定程度后不再扩展,维持在一个稳定的区域。

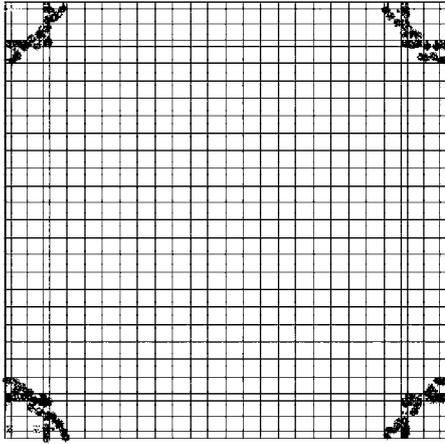


图6 破坏后裂缝分布情况

Fig. 6 Cracking distribution near slab-column nodes after damage

从图4和图6可以看出冲切破坏后板柱节点附近板顶的裂缝分布近似为围绕框架柱边的三角形。考虑到板柱结构的双向对称性,对于板柱结构的内柱节点,板面冲切裂缝的分布应为与柱角相切,绕框架柱旋转45°角的正方形。

### 2.2 碳纤维加固板柱节点的冲切破坏

采用碳纤维布对现浇混凝土板柱结构四角的板柱节点进行加固。加固以后板柱结构混凝土开裂前板柱节点附近的应力云图如图7所示,开裂后的应力云图如图8所示,板柱节点冲切破坏后的应力云图如图9所示。碳纤维加固板柱结构混凝土开裂后在板柱节点附近裂缝分布如图10所示,在板柱节点发生冲切破坏后裂缝分布情况如图11所示。

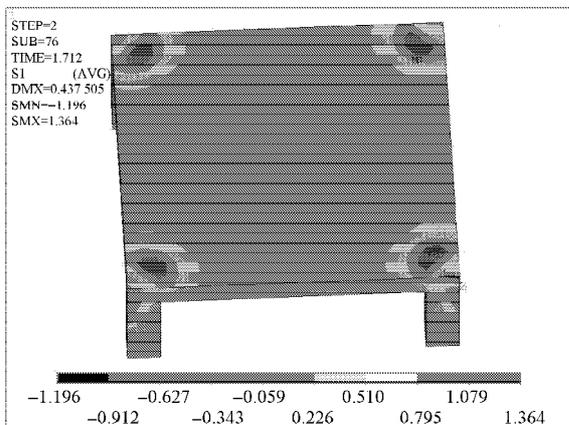


图7 开裂前板柱节点主应力云图

Fig. 7 The principal stress nephogram of slab-column node before cracking

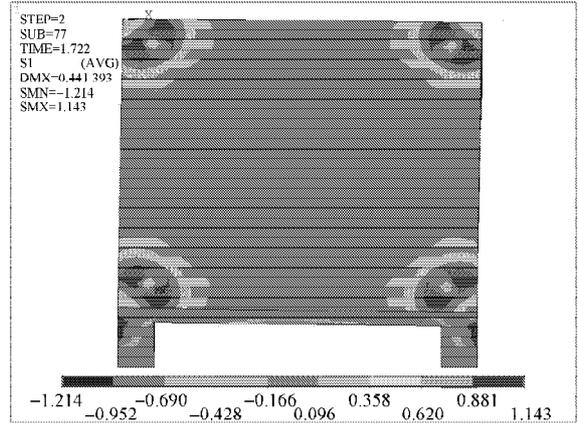


图8 开裂后板柱节点主应力云图

Fig. 8 The principal stress nephogram of slab-column node after cracking

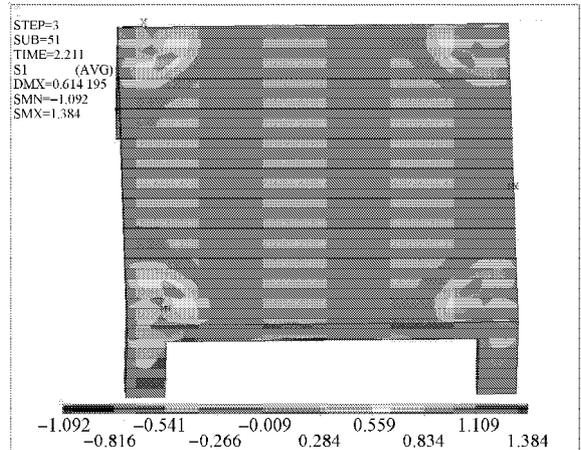


图9 破坏后板柱节点主应力云图

Fig. 9 The principal stress nephogram of slab-column node after damage

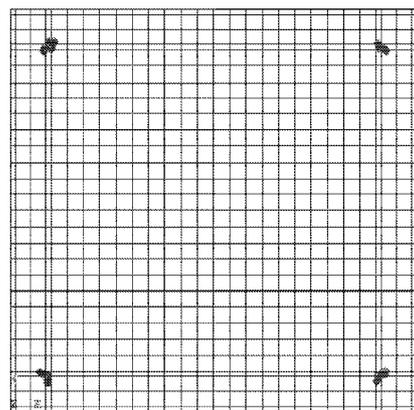


图10 开裂后板柱节点裂缝分布

Fig. 10 Cracking distribution near slab-column nodes after cracking

由图7可以看出,用CFRP加固以后的现浇混凝土板柱结构,在开裂前的受力状态与未加固的现浇混凝土板柱结构相同,也在板柱节点周围形成一个近似半圆形的冲切区域,冲切区域成斜锥型,应力沿板厚方向分布非常明显,应力梯度变化较大。板

柱节点附近的柱顶板面出现最大拉应力，最大拉应力值略大于未加固板柱结构，约为 1.364 MPa。

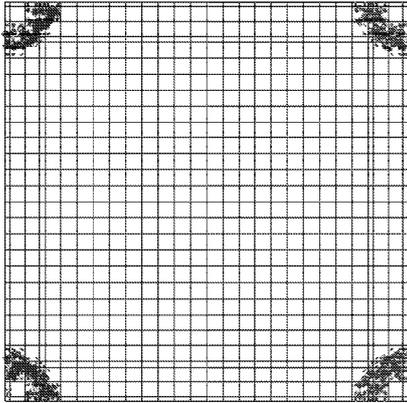


图11 破坏后裂缝分布情况

Fig. 11 Cracking distribution near slab-column nodes when damage

从图 8 和图 10 可以看出，随着荷载继续增加，在板柱节点附近板顶受拉区出现冲切裂缝。由于板柱节点粘贴在双向框架柱间方向，相比未加固的现浇混凝土板柱结构，产生的冲切裂缝集中在除碳纤维布加固以外的框架柱角部附近板面，冲切区域明显减小。由于裂缝产生，冲切区域应力有所释放，最大应力略有降低，冲切区域开始由柱角向板内扩散发展。随着荷载进一步增加，板柱节点附近板顶的冲切裂缝不断扩展并相继产生新的受拉裂缝。从图 9 和图 11 可以看出，冲切破坏后板柱节点附近板顶的裂缝分布近似为围绕框架柱边的三角形，裂缝密而多，冲切区域明显大于未加固的现浇混凝土板柱结构。

### 2.3 加固与未加固结构比较分析

未加固和用碳纤维布进行板柱节点加固的现浇混凝土板柱结构，跨中板面挠度随楼面施加荷载的变化曲线如图 12 所示。

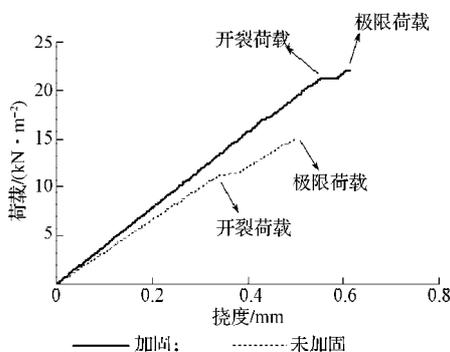


图12 荷载-板跨中挠度曲线

Fig. 12 The load-deflection curves

由荷载-板跨中挠度曲线可以看出，用 CFRP 加固的现浇混凝土板柱节点，明显提高了板柱结构的

极限承载能力，而且提高了板柱节点抗冲切刚度和破坏时的延性，这对结构是有利的。CFRP 加固明显提高了板柱节点附近混凝土抗冲切开裂荷载，能使钢筋强度得到较充分发挥。对比结果表明，冲切破坏时，未进行加固的混凝土板柱结构板跨中挠度为 0.503 mm，极限荷载为 14.0 kN/m<sup>2</sup>；用碳纤维加固的混凝土板柱结构，板跨中挠度为 0.678 mm，极限荷载为 24.6 kN/m<sup>2</sup>。结果表明用碳纤维加固板柱节点将冲切承载力提高到未加固时的 1.76 倍。

对比未加固和加固节点的 2 种混凝土板柱结构应力图可以看出，在开裂前，2 种结构模型计算的应力在板柱节点附近的分布相同，此时外加荷载主要由混凝土承受，在板柱节点板面附近出现的最大拉应力非常接近。开裂后，2 种结构模型计算的应力在板柱节点附近的分布明显不同。未加固的混凝土板柱结构在板柱节点附近出现裂缝后，应力立即释放，节点刚度立即下降，产生的裂缝沿柱周边分布，此时，板柱节点附近的最大拉应力约为 0.952 MPa。用 CFRP 加固后的现浇混凝土板柱结构在板柱节点附近出现裂缝后，应力有所释放，节点刚度也有所下降，但降低的幅度小于未加固的板柱结构，产生的裂缝主要集中在框架柱角部，此时，板柱节点附近的最大拉应力约为 1.143 MPa。上述说明，用碳纤维布加固后明显改善了板柱节点附近的应力分布，约束了混凝土裂纹的进一步产生，进而提高了板柱节点附近的抗冲切刚度。发生冲切破坏时，2 种结构模型计算的冲切破坏区域均成斜锥形，但用碳纤维加固板柱结构在板柱节点附近的抗冲切范围明显大于未加固的板柱结构。

## 3 结论

1) 有限元的计算结果表明，用碳纤维加固混凝土板柱结构的板柱节点，可以明显改善板柱节点附近的应力状态，提高板柱节点附近的抗冲切刚度和延性，进而提高板柱节点的抗冲切能力。

2) 用分离法分别建立有限元计算模型，可以较好地模拟混凝土、钢筋和碳纤维布的力学性能，用这种方法建立的有限元计算模型较好地模拟了现浇混凝土板柱结构板柱节点附近的冲切区域，计算结果收敛性较好。

### 参考文献：

- [1] 舒兆发. 板柱结构的中柱节点传递剪力和不平衡弯矩的冲切承载力[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2003, 30

- (5): 56-60.  
Shu Zhaofa. Punching Capacity of Interior Slab-Column Connection with Transfer of Shear and Unbalanced Moment [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2003, 30(5): 56-60.
- [2] Yitzhaki D. Punching Strength of Reinforced Concrete Slabs [J]. ACI Journal Proceedings, 1966, 63(5): 527-542.
- [3] Hawkins N M, Criswell M E, Roll F. Shear Strength of Slabs Without Shear Reinforcement[J]. ACI Special Publication, 1974, 42(30): 677-720.
- [4] 余琼, 陆洲导. 碳纤维受弯加固梁变形性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(2): 49-55.  
Yu Qiong, Lu Zhoudao. Study on Deformation of RC Beams Strengthened by CFRP Sheets[J]. Sichuan Building Science, 2006, 32(2): 49-55.
- [5] 扶长生, 吕西林, 康婧. 柱支承双向板及板柱节点的设计与研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(2): 98-106.  
Fu Changsheng, Lü Xilin, Kang Jing. Study and Design of Column-Supported Slab and Its Connection[J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(2): 98-106.
- [6] 宋珂, 王兴国, 郝泽静, 等. 现浇框架结构柱端CFRP加固强柱弱梁效果分析[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2012, 37(1): 21-28.  
Song Ke, Wang Xingguo, Hao Zejing, et al. Research on the Efficiency of Strong Column and Weak Beam Design for Reinforced Concrete Frame Retrofitted with Hybridized CFRP[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2012, 37(1): 21-28.
- [7] 于洁, 陈伶俐, 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.
- [8] 陆新征, 江见鲸. 利用 ANSYS solid65 单元分析复杂应力条件下的混凝土结构[J]. 建筑结构, 2003, 33(6): 22-24.  
Lu Xinzheng, Jiang Jianjing. Analysis for Concrete Structure Under Complex Stress Condition with solid65 FEM Element of ANSYS[J]. Building Structure, 2003, 33(6): 22-24.
- [9] 韩向丽. 基于三参数统一强度理论的混凝土板抗冲切承载力分析[D]. 西安: 长安大学, 2011.  
Han Xiangli. Punching Shear Capacity Analysis of Concrete Slab Based on the Three-Parameter Unified Strength Theory [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 35.  
The People's Republic of China Ministry of Housing and Urban-Rural Construction. GB50010—2010 Code for Design of Concrete Structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 35.

(责任编辑: 邓光辉)