

# 预制钢板夹心混凝土组合板与柱连接 及其有限元分析

陈百玲, 殷悦, 高海洋, 王连广  
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 为满足装配式组合板-柱结构节点的承载要求,提出了两种预制钢板夹心混凝土组合板与结构柱节点的连接构造. 利用ABAQUS有限元软件建立了组合板-柱连接节点的数值计算模型,分析了预制节点在冲切荷载作用下的承载性能及主要设计参数对其受力和变形性能的影响. 结果表明,预制连接节点与同参数条件下的现浇节点相比,能够在保证良好延性的同时显著提升抗冲切承载力,说明连接组件能够对节点抗冲切性能产生积极贡献. 此外,在外环板-贯穿螺栓连接中,建议选择方形或十字形外环板且强度等级与组合板一致,均取为Q345,并采用16个贯穿螺栓放射排布. 对于外伸组合板-环向法兰连接,建议法兰厚度控制在20 mm左右,以获得最优的性价比.

**关键词:** 装配式;板柱节点;组合板;数值模拟;受力分析

中图分类号: TU 398.9 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)10-1476-09

## Connection Between Precast Steel-Concrete-Steel Sandwich Slab and Column and Finite Element Analysis

CHEN Bai-ling, YIN Yue, GAO Hai-yang, WANG Lian-guang

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YIN Yue, E-mail: musicyinyue@163.com)

**Abstract:** In order to meet the bearing requirements of prefabricated composite slab-column joints, two types of connection joints between steel-concrete-steel sandwich slab and structural column are proposed. Using ABAQUS finite element software, the numerical calculation model of composite slab column joint is established, and the bearing capacity of precast joint under punching load and the influence of main design parameters on its mechanical and deformation properties are analyzed. The results show that, compared with the cast-in-place joints under the same condition, the prefabricated connection joints can significantly increase the punching shear capacity while ensuring good ductility. These indicate that the connection components can make a positive contribution to the punching shear resistance of the joints. In addition, it is recommended to use a 16 through bolts radial arrangement and choose a square or cross shaped external diaphragm in the external diaphragm-thru bolt connection. The diaphragm's strength grade is consistent with the composite slab, which is taken as Q345. For the cantilever composite slab-circumferential flange connection, it is suggested that the flange thickness should be controlled at about 20 mm, so as to make the joint own a higher cost performance.

**Key words:** prefabricated; slab-column joint; composite slab; numerical simulation; force analysis

随着建筑结构功能的多样化发展,板柱结构因其平面布置灵活性强、空间宽阔且利用率高等优势,逐渐受到了国内外学者的广泛关注.为了

提高板柱节点的承载性能,学者们提出了多种新型抗冲切组件并讨论了不同配置方法对板柱节点性能的影响<sup>[1-3]</sup>.

抗剪栓钉或螺栓作为抗冲切构件易安装控制,对主筋放置无干扰,同时能有效控制板顶和板底的剪切裂缝,在工程中的应用较为广泛.金玉等<sup>[4]</sup>对配置不同参数栓钉的钢筋混凝土双向板柱节点的受力性能也进行了研究,对比分析实验结果表明,增大栓钉直径可使抗变形能力提高36%,增大栓钉高度或提高栓钉强度也能同时改善试件的抗冲切性能,且采用放射状布置的栓钉比正交布置的情况具有更好的性价比. Cantone等<sup>[5]</sup>设计了一种采用大直径双头螺栓作为抗剪连接件的新型板柱抗冲切加固系统.通过11个板柱节点的抗冲切实验发现带有此种抗剪连接件的板柱节点与传统板柱节点相比,抗冲切性能和变形能力都有显著提高. Almeida等<sup>[6]</sup>对利用抗剪螺栓加固的板进行了往复荷载实验,试件的破坏模式为形成塑性铰的受弯破坏,能够承受更大的水平荷载,具有更高的延性和耗能能力,由此表明螺栓加固是提高板柱结构抗震性能的有效方法. Einpaul等<sup>[7]</sup>通过12个足尺试件受竖向荷载作用的实验,比较了配置11种不同抗冲切元件的板柱节点的抗冲切性能,涉及了包括双头栓钉、箍筋、弯起钢筋以及后安装的加固抗剪螺栓等在内的抗剪加固系统.目前工程中应用的板柱体系大多局限于传统的现浇混凝土结构,且最薄弱的节点区域强度常难以得到保证.

针对板柱结构备受关注的冲切脆性破坏问

题,引入组合结构构件替换常规的钢筋混凝土构件,并结合绿色环保且施工便捷的装配式技术,提出了两种装配式钢板夹心混凝土组合板与结构柱连接的连接构造.利用ABAQUS有限元分析软件建立适合装配式组合板与柱连接节点的计算模型,通过分析预制节点在冲切荷载作用下的承载性能及主要设计参数对其受力和变形性能的影响,从而优化预制节点构造.

## 1 节点构造

为满足装配式组合板与柱连接节点的承载要求,提出了两种钢板夹心混凝土组合板与结构柱连接的方法.根据预制组合板与柱中部连接的特点,提出了整块组合板直接与柱相连以及利用柱上的预制外伸组合板与柱相连的两个方向的设计思路.

在装配式梁柱节点连接中,常有在制作结构柱的同时预制出外伸悬臂梁的构造形式,从而可利用预制外伸梁实现与外部梁构件之间的连接.环向法兰连接是将普通板状法兰盘改进为环向套筒的形式,并且内、外侧环向法兰分别与柱上外伸组合板及外部组合板整体预制,装配时通过法兰的对应嵌套,再以高强螺栓在环向法兰的上下两端拧紧固定,从而实现节点连接.图1为组合板与柱的外伸组合板-环向法兰连接.

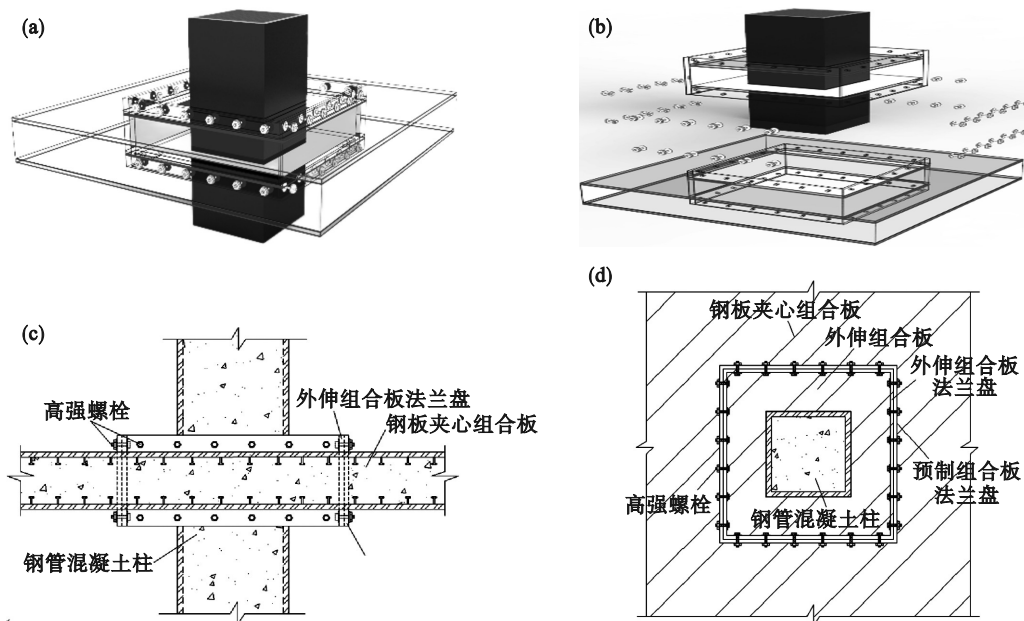


图1 组合板与柱的外伸组合板-环向法兰连接

Fig. 1 Cantilever composite slab-circumferential flange connection between composite slab and column

(a)—连接节点装配示意图;(b)—连接节点拆分示意图;(c)—主视图;(d)—俯视图.

外环板与贯穿螺栓连接构造较为简单,节点处主要由外环板及高强螺栓抵抗弯矩和剪力,外环板的形状、尺寸也可根据工程实际需求灵活选用.外形美观平整且利于节约空间,现场装配方便,不存在湿作业,施工不受季节影响.整体思路是将外环板焊接在柱外壁钢材上,如柱体构造钢材或根据连接需要设计的加劲钢板及环向钢板套筒等,以保证外环板与结构柱的连接强度.与此同时,组合板与外环板之间通过高强贯穿螺栓相连,从而实现快速装配,图2为组合板与柱的外环板-贯穿螺栓连接.

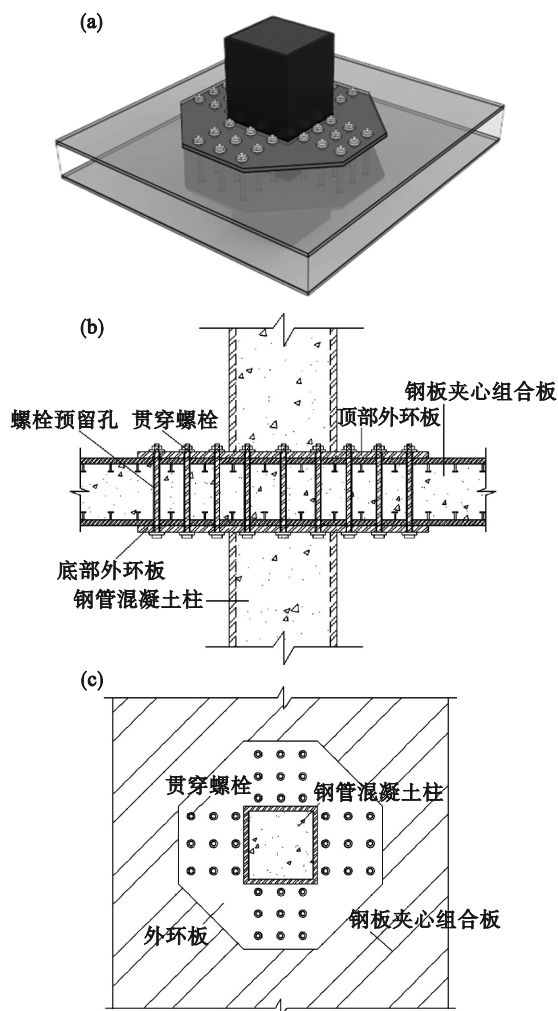


图2 组合板与柱的外环板-贯穿螺栓连接

Fig. 2 External diaphragm-thru bolt connection between composite slab and column

(a)—连接节点装配示意图;  
(b)—主视图;(c)—俯视图.

## 2 数值模拟

使用ABAQUS有限元软件建立钢板夹心混凝土组合板与钢管混凝土柱连接节点的有限元模

型,对外环板-贯穿螺栓和外伸组合板-环向法兰连接节点在竖向冲切荷载作用下进行全过程分析.以下详细介绍预制板-柱连接节点模型建模过程.

### 2.1 有限元模型建立

利用ABAQUS有限元软件分别建立了装配式外环板-贯穿螺栓和外伸组合板-环向法兰连接节点模型,其连接构造方式参照第1节,同时建立了同参数的现浇组合板-柱模型.组合板整体板跨尺寸为 $2\,400\text{ mm}\times 2\,400\text{ mm}$ ,方钢管混凝土柱的钢管截面尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,柱高取 $2\,000\text{ mm}$ ,外环板截面尺寸为 $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}$ ,中部开洞尺寸为 $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ ,外伸组合板的外伸长度为 $100\text{ mm}$ ,环向法兰盘截面拉伸高度为 $400\text{ mm}$ .

所建现浇节点模型图、外环板-贯穿螺栓连接和外伸组合板-环向法兰连接预制节点模型的装配图,如图3所示.设计并建立了38个预制外环板-贯穿螺栓组合板-柱节点模型和20个预制外伸组合板-环向法兰连接节点模型,通过改变材料的厚度、强度等级及螺栓数量等关键参数来探究不同设计参数对预制节点性能的影响.并且,选取组合板厚为 $150\text{ mm}$ 两种预制节点与现浇节点在冲切荷载作用下的受力状态进行对比分析.

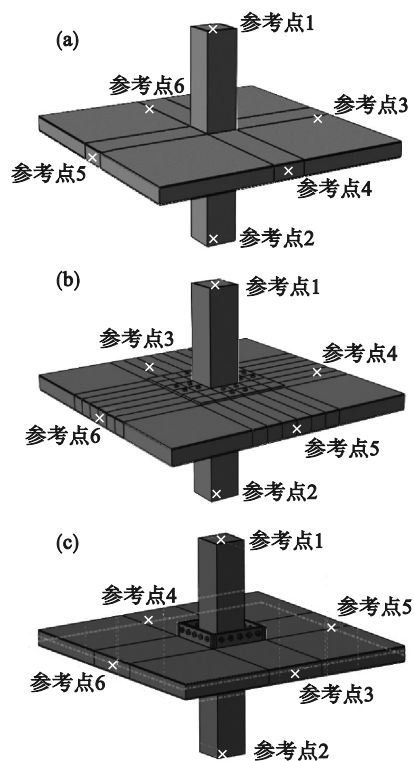


图3 模型构件装配示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the assembly of model components

(a)—现浇组合板-柱节点;(b)—预制外环板-贯穿螺栓连接节点;(c)—预制外伸组合板-环向法兰连接节点.

## 2.2 材料属性设置、相互作用设置及网格划分

选用混凝土结构设计规范 GB 50010—2010<sup>[8]</sup>提供的受压本构模型,钢材本构模型选用理想弹塑性模型.柱身钢管选用 Q235 钢材,柱内混凝土强度等级选用 C30.螺栓选用 10.9 级 M24 高强螺栓,公称抗拉强度为 1 000 MPa,屈服强度为 900 MPa.各部件均采用 C3D8R 六面体减缩积分三维实体单元进行模拟.

各部件间的相互作用关系如下:对于现浇节点模型中的钢管混凝土柱,考虑钢管与钢管内核心混凝土接触面之间的摩擦作用,将其设定为“表面与表面接触”,采用硬接触模拟二者的法向接触,罚函数模拟切向接触,摩擦系数取 0.6;由于现浇节点为整体制作浇筑而成,组合板的顶底钢板与夹心混凝土层及组合板与柱身钢管之间均采用“绑定”约束连接.对于预制外环板-贯穿螺栓连接节点模型,组合板的顶底钢板和夹心混凝土层之间、外环板与钢管之间设置为绑定;其余部件之间的界面接触关系均考虑为“面面接触”相互作用.对于预制外伸组合板-环向法兰连接节点模型,内、外侧环向法兰盘分别与外伸组合板以及外部组合板的顶底钢板及夹心混凝土层之间的连接均采用“绑定”约束;考虑内外环向法兰之间、高强螺栓杆与环向法兰螺栓孔壁、高强螺栓螺母分别与内外环向法兰接触面之间的摩擦作用,均设定为“面面接触”相互作用.两种预制节点模型中的“面面接触”相互作用均设定为法向硬接触、切向罚函数摩擦接触,并通过不同的摩擦系数实现定义,以模拟真实情况下的界面关系.

规则区域采用结构网格划分,而对中心对称的贯穿螺栓或带有螺栓孔的区域采用扫掠网格中性轴算法进行网格划分,并在螺栓孔等网格较细之处进行局部布种,以保证良好的网格形状和合理的网格密度.完成网格划分后的预制组合板连接节点模型,如图 4 所示.

## 2.3 边界条件及荷载施加方式

在柱顶底端分别设置参考点 1 和 2,并与顶底表面设定为运动耦合约束,采用位移控制的加载制度作为竖向荷载,位移施加在与柱顶通过耦合命令约束在一起的参考点 1 上,将加载点与加载面的自由度相关联,以实现柱端均匀加载.在组合板 4 个边缘垂直面分别设置参考点 3~6,与板端四周垂直表面采用连续分布耦合,建立简支的边界条件,同样施加在与组合板四周表面分

别耦合在一起的参考点 3~6 上.

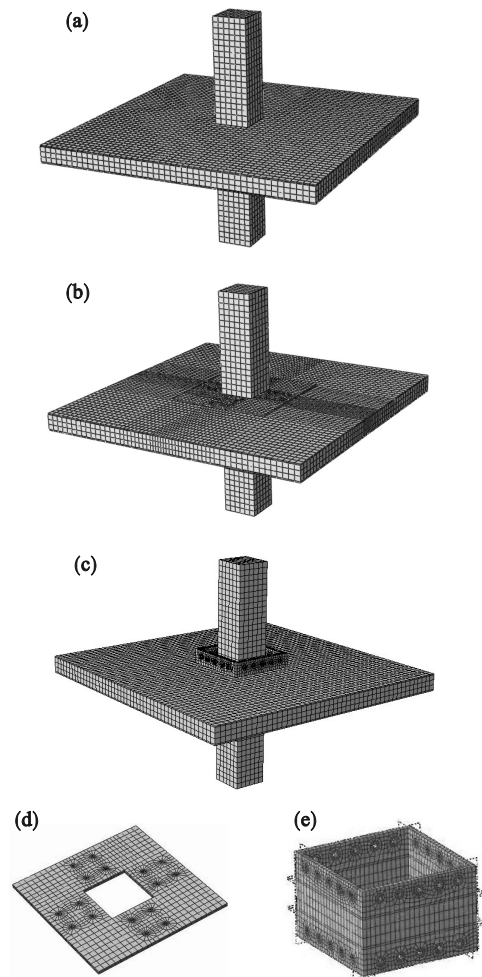


图 4 有限元模型及网格划分图

Fig. 4 Finite element model and meshing diagram  
(a)—现浇节点网格模型;(b)—外环板-贯穿螺栓节点网格模型;(c)—外伸组合板-环向法兰节点网格模型;  
(d)—外环板;(e)—环向法兰盘.

对于预制组合板-柱连接节点模型,由于考虑到高强贯穿螺栓的预紧力施加,依次建立 4 个分析步骤,首先建立步骤 1 对螺栓施加 45 kN 的预拉力,建立螺母与外环板之间的摩擦接触;接着在步骤 2 对螺栓施加 225 kN 的全部预拉力;然后在步骤 3 移除螺栓预拉力,使螺杆保持在步骤 2 结束时的长度,若有其他外加荷载,允许螺杆长度发生变化.最后步骤 4 对柱顶施加竖向位移进行加载.

## 3 数值模拟结果与分析

### 3.1 现浇节点与预制连接节点对比分析

为了探究外环板-贯穿螺栓连接模型(SCJ-1-1)和外伸组合板-环向法兰连接模型(SCJ-2-1)

两种预制节点在冲切荷载作用下的受力状态与承载性能,将其计算得到的荷载-位移曲线及应力变形云图与同参数条件下的现浇节点模型(SCJ-XJ)进行三者之间的横向对比,以便更直观地对各连接节点的抗冲切承载性能关键指标加以分析。

### 3.1.1 荷载-位移曲线及承载力对比

模型 SCJ-2-1 与 SCJ-XJ, SCJ-1-1 的荷载-位移曲线对比,如图 5 所示.通过有限元计算得到 3 个模型的极限荷载与极限位移、屈服荷载与屈服位移以及承载力的变化情况,如表 1 所示。

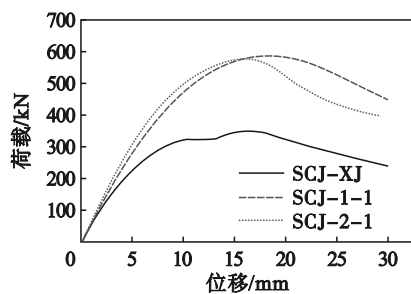


图5 SCJ-XJ与SCJ-1-1,SCJ-2-1模型的荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of SCJ-XJ, SCJ-1-1 and SCJ-2-1 models

表1 SCJ-XJ与SCJ-1-1,SCJ-2-1模型的荷载及位移  
Table 1 Load and displacement of SCJ-XJ, SCJ-1-1 and SCJ-2-1 models

节点模型	极限荷载	极限位移	屈服荷载	屈服位移	承载力增幅
	kN	mm	kN	mm	%
SCJ-XJ	352.44	16.37	307.84	8.46	—
SCJ-1-1	589.88	18.93	535.56	12.65	67.37
SCJ-2-1	578.42	15.51	520.27	11.06	64.12

由图 5 和表 1 可知,模型 SCJ-1-1 和 SCJ-2-1 的极限抗冲切承载力分别为 589.88 kN 和 578.42 kN,与模型现浇节点 SCJ-XJ 相比均有较为显著的提升,满足承载力要求.此外,预制节点的屈服荷载和屈服位移也都高于现浇节点.由此说明本文提出的预制构件连接方案,不但由于组合结构的融入大大提高了结构的抗冲切承载力和延性,也可以实现从现浇结构向装配式结构转化的同时,同步改善板柱节点的受力性能.同时可以发现,在竖向冲切荷载作用下,预制外伸组合板-环向法兰连接节点(SCJ-2-1)与预制外环板-贯穿螺栓连接节点(SCJ-1-1)的荷载-位移曲线所经历的过程相似,荷载达到极值点之前的曲线可以分为最初受荷线性增长的弹性阶段以及

之后非线性增长的弹塑性阶段两部分.两种预制连接节点的初始刚度基本相同,极限抗冲切承载力也仅相差 1.94%.但预制外伸组合板-环向法兰连接节点(SCJ-2-1)的屈服位移和极限位移稍小,在极限荷载点之后曲线的下降速率更大,总体趋势仍较缓,两种预制节点均表现出了良好的延性.在达到极限抗冲切承载力时,提供冲切抗力的连接组件基本已受剪屈服,随后节点处发生组合板的冲切破坏。

### 3.1.2 应力分析

使用 ABAQUS 有限元软件计算,设置 75% 为应力的平均阈值,即当相对应力小于 75% 时,对该应力求平均. ABAQUS 有限元软件中的应力  $\sigma$  按照 Mises 准则计算并输出,在应力云图上,不同单元的 Mises 应力对应显示不同的颜色.预制外环板-贯穿螺栓连接和外伸组合板-环向法兰连接的板-柱节点各部件应力分布,见图 6 和图 7。

外环板-贯穿螺栓连接节点和现浇节点的组合板结构整体受力过程相近,最终失效模式均为冲切锥体逐渐发展的受冲切破坏,表现出冲切楔形体下凸的形态<sup>[9-10]</sup>.外环板-贯穿螺栓连接节点在组合板冲切锥体形成时整个结构变形并不明显,同时组合板顶、底部钢板的屈服面积较现浇节点更大,冲切破坏截面尺寸同步扩大.这说明由于外环板和贯穿螺栓的存在,有效控制了结构的挠度和变形,使得组合板的材料强度得到充分发挥,这也是预制节点抗冲切承载力提高的主要原因之一。

与预制外环板-贯穿螺栓连接的整块组合板与柱的连接不同,由于柱上预制外伸组合板的存在,在竖向冲切荷载作用下,首先外伸组合板沿柱角处发生应力集中,混凝土达到极限强度开裂,形成内部冲切锥体;随着加载的继续,外伸组合板钢板屈服,力沿着与柱边呈 45° 角的方向通过环向法兰连接向外部组合板传递,同时在环向法兰与内外组合板连接的转角处出现较大区域的应力集中.从应力云图可以看出,利用环向法兰和螺栓连接的外伸组合板及外部组合板也表现出了受冲切破坏的形态,但外部组合板以环向法兰连接处为中心形成冲切锥体,临界截面更大,且当柱上外伸组合板达到极限应力状态后,仍能够保证整个结构在顶底钢板的约束下不发生脆性破坏从而进行荷载传递和应力重新分布,最终破坏时钢板均呈现出较理想的屈服状态。

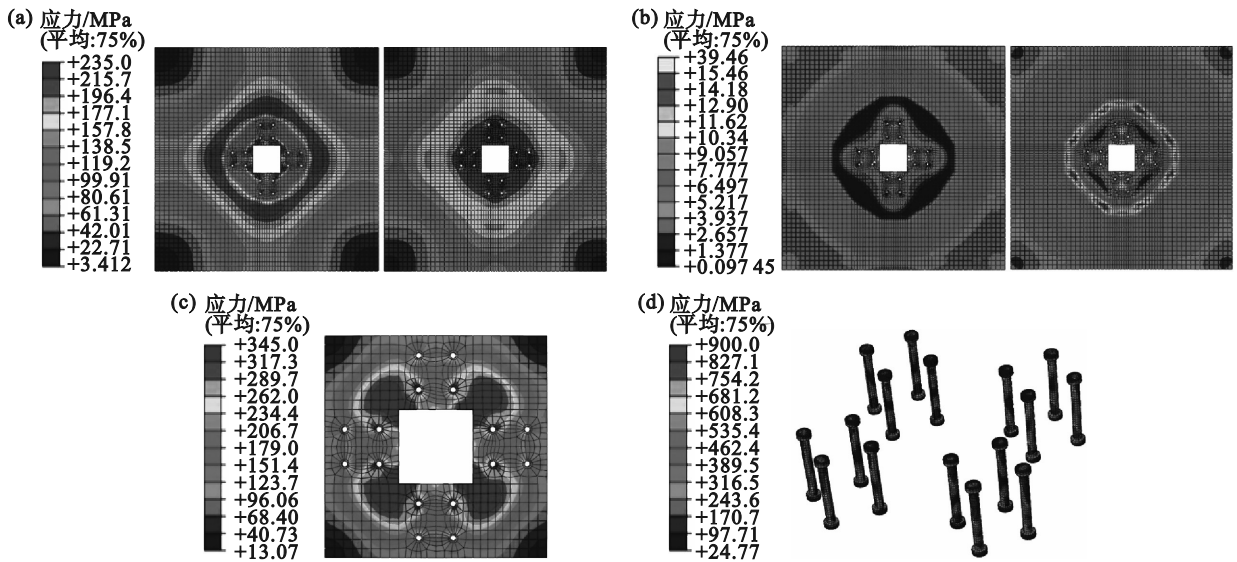


图6 预制外环板-贯穿螺栓连接节点各部件应力云图

Fig. 6 Component stress nephogram of precast external diaphragm-thru bolt connection joint

(a)一组合板顶部和底部钢板应力云图;(b)一组合板混凝土层顶部和底部应力云图;

(c)一底部外环板应力云图;(d)一贯穿螺栓应力云图.

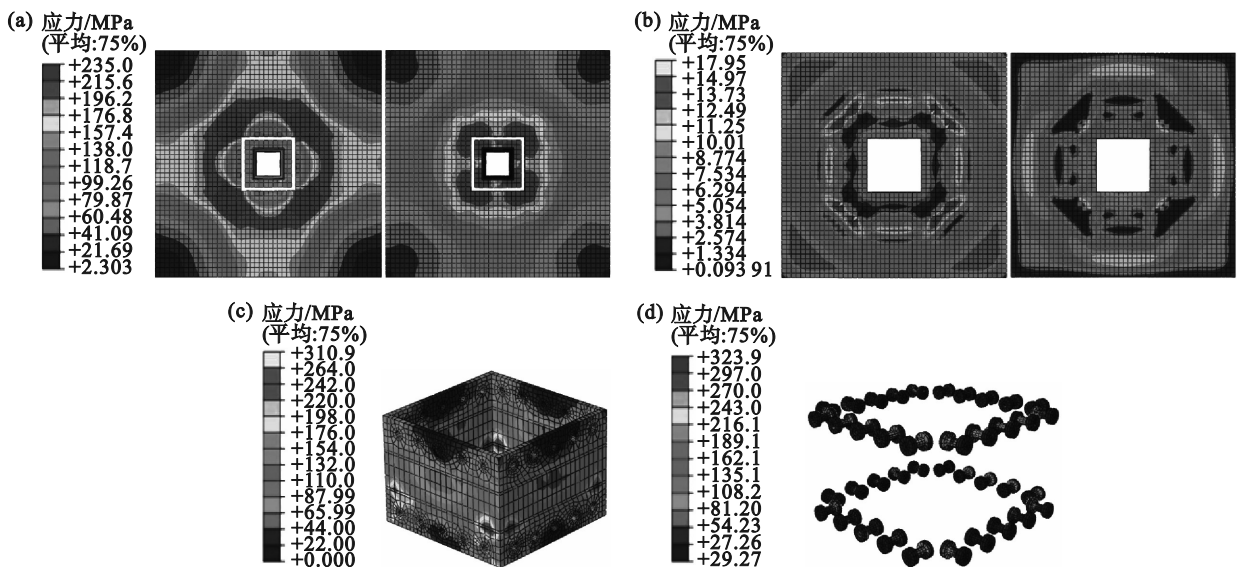


图7 预制外伸组合板-环向法兰连接节点各部件应力云图

Fig. 7 Component stress nephogram of precast cantilever composite slab-circumferential flange connection joint

(a)一外部与外伸组合板顶部和底部钢板;(b)一外部组合板混凝土层顶面和底面;

(c)一内侧环向法兰;(d)一高强螺栓.

### 3.2 预制外环板-贯穿螺栓节点参数分析

1) 组合板厚度.图 8a 给出了组合板厚度  $d_f$  分别为 130, 140, 150, 160, 170 mm 时节点受冲切荷载作用的荷载-位移曲线.在组合板厚度从 130 mm 增加到 170 mm 的过程中,节点的抗冲切承载力基本呈线性增长,从 549.51 kN 提高到了 719.97 kN,增幅达 31%.组合板中心竖向极限位移随着组合板厚度的增加而相应减小,曲线的下降段也更陡峭.5 个模型的破坏形态虽然均为弯冲破坏,但随着板厚的增加逐渐趋向于脆性破坏形

式的冲切破坏,说明组合板厚度的提高增大了节点的刚度但也在一定程度上降低了节点的延性.

2) 组合板混凝土强度等级.图 8b 给出了组合板混凝土强度等级分别为 C30, C35, C40, C45, C50 时节点受冲切荷载作用的荷载-位移曲线.在混凝土强度从 C30 提高到 C45 的过程中,节点的抗冲切承载力与混凝土强度的增长近似成正比,平均每次较前一级混凝土强度等级的增幅为 1.40% 左右,从 C45 提高到 C50 时,承载力增幅提升至 2% 左右.由此可知,提高混凝土强度等级对

预制外环板-贯穿螺栓连接节点的抗冲切承载性能的提升收效甚微。

3) 外环板厚度. 图 8c 给出了外环板厚度  $d_c$  分别为 10, 15, 20, 25, 30 mm 时节点受冲切荷载作用的荷载-位移曲线. 当外环板厚度从 10 mm 增加到 30 mm 时, 节点的极限荷载分别提升了 8.04%, 16.59%, 25.06%, 31.43%. 在 20 mm 范围内增加外环板厚度可以较大程度地提高预制节点的受力性能, 但当厚度达到 25 mm 之后, 抗冲切承载力的提升效率有所降低。

4) 外环板形状. 图 8d 给出了正方形、十字形和八边形 3 种外环板形状对应的节点受冲切荷载作用的荷载-位移曲线. 正方形及十字形外环板与八边形外环板相比, 对节点抗冲切承载性能提升的贡献更大, 这可能是因为节点受冲切荷载作用时, 正方形和十字形外环板的构造使其穿过冲切破坏锥体的屈服面积较大, 对节点提供的冲切抗力较大。

5) 贯穿螺栓数量. 图 8e 给出了贯穿螺栓总数量  $n_t$  分别为 12, 16, 20, 24 个时节点受冲切荷载作用的荷载-位移曲线. 从 12 个螺栓增加到 16 个螺栓时, 极限荷载提高了 4.95%, 但当螺栓数量从 16 增加到 20, 24 个时, 较前一级极限抗冲切承载力均只相应提高了不到 1%, 且曲线变化趋势和节点延性均无明显变化. 为此, 建议选择柱周每侧 4 个螺栓, 总共 16 个螺栓的布置方案, 以充分利用贯穿螺栓的抗冲切性能, 避免材料的浪费。

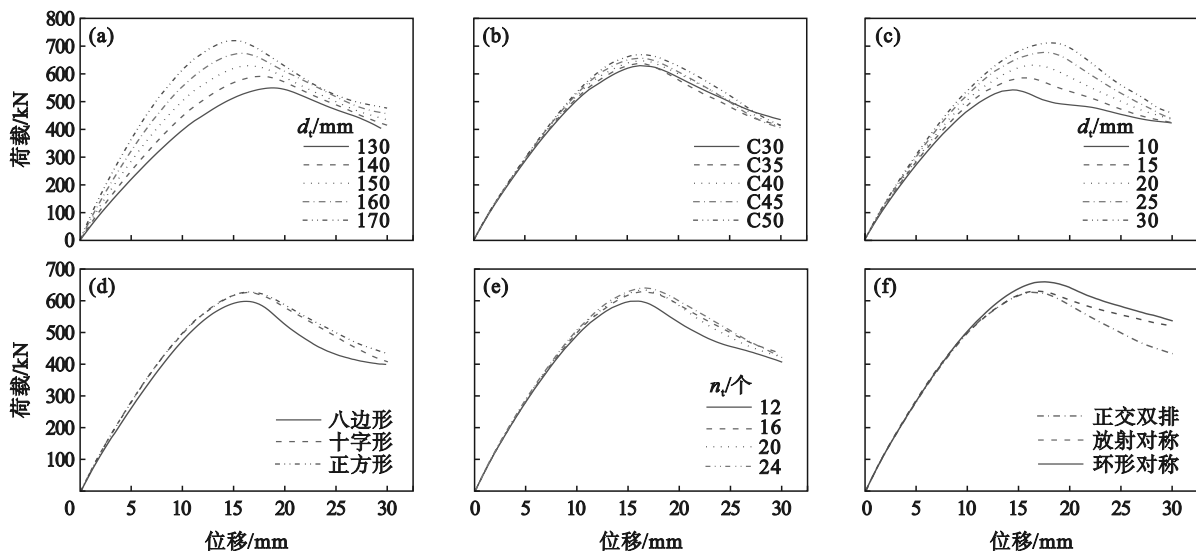
6) 贯穿螺栓排布. 选择了正交双排、放射对称以及环形对称 3 种布置形式进行螺栓排布设计, 同时保持其他参数不变, 设置螺栓总数为 16 和 24 个两个对照组进行研究, 如图 8f 和图 8g 所

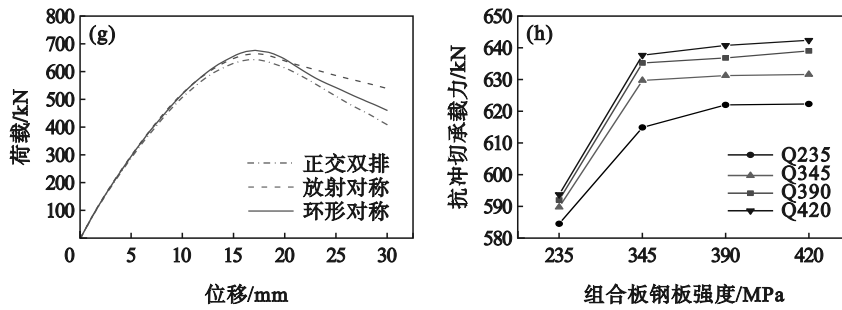
示. 当螺栓总数为 16 个时, 贯穿螺栓呈正交或放射布置时, 节点抗冲切承载力只相差不到 0.5%, 可见采用环形布置的节点抗冲切承载力最大, 高出正交布置节点 5.16%. 在延性方面, 采用放射布置贯穿螺栓的节点最佳, 环形布置次之, 正交布置节点的延性最差, 发生冲切破坏的趋势最明显. 当贯穿螺栓总数增加为 24 个时, 环形布置节点的极限抗冲切承载力仍是三者中最高, 为 678.37 kN. 同时 24 个螺栓的荷载-位移曲线下降段相比 16 个螺栓的情况均更加陡峭且节点延性差距更显著。

7) 钢板与外环板强度. 图 8h 给出了外环板钢材牌号分别为 Q235, Q345, Q390, Q420 的情况下, 改变组合板钢板强度, 计算得到 4 组节点的抗冲切承载力变化情况. 由图可见, 组合板钢板强度和与外环板的钢材强度只能是在一定范围内提升节点的抗冲切承载力. 外环板和组合板钢板的强度等级在达到 Q345 之后, 对节点承载力提升的贡献逐渐弱化. 因此, 建议外环板及组合板钢板的钢材牌号均取为 Q345。

### 3.3 预制外伸组合板-环向法兰节点的参数分析

1) 组合板混凝土层厚度. 图 9a 给出了组合板混凝土层厚度  $d_c$  分别为 110, 120, 130, 140, 150 mm 时的荷载-位移曲线. 在组合板混凝土层厚度由 110 mm 增加到 150 mm 的过程中, 随着混凝土层厚度的增加, 节点初始刚度逐渐增大, 且能够在保证极限位移仅在 7% 范围内小幅波动情况下使极限抗冲切承载力显著提高 46.98%. 混凝土层厚度达到 130 mm 之后, 增速逐渐放缓, 同时荷载-位移曲线在达到极限荷载后的下降趋势也越来越明显, 失效模式逐渐转为冲切破坏占比较重的弯冲破坏形式。





注: 图(d)中的外环板形状、图(f)和图(g)中贯穿螺栓排布方式对应的应力示意图:

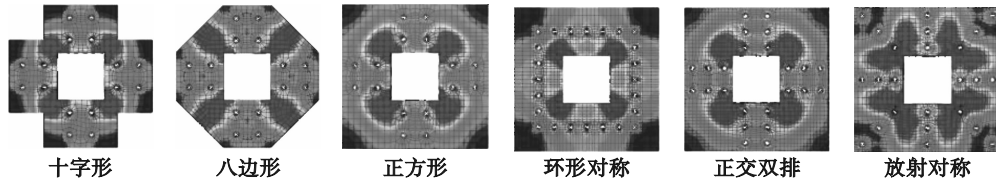


图 8 预制外环板-贯穿螺栓连接节点的分析

Fig. 8 Parametric analysis of prefabricated external diaphragm-thru bolt connection

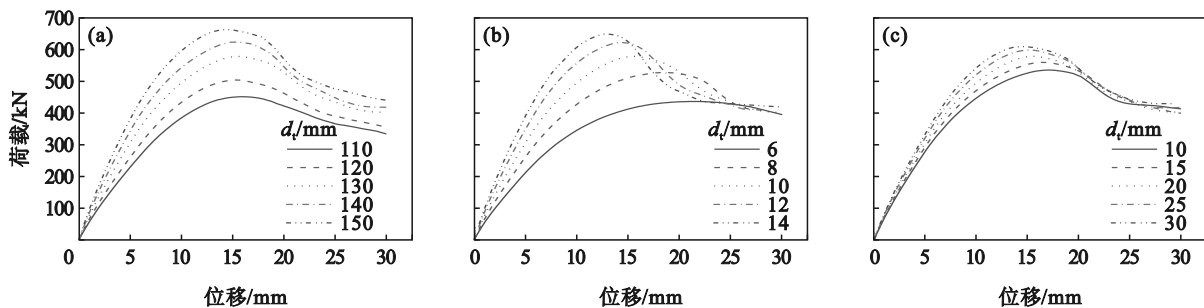
(a)—组合板厚度; (b)—组合板混凝土强度等级; (c)—外环板厚度; (d)—外环板形状; (e)—贯穿螺栓数量;  
(f)—贯穿螺栓排布(16个螺栓); (g)—贯穿螺栓排布(24个螺栓); (h)—钢板与外环板强度.

2) 组合板钢板厚度. 图 9b 给出了组合板钢板厚度  $d_s$  分别为 6, 8, 10, 12, 14 mm 时的荷载-位移曲线. 当钢板厚度由 6 mm 提高到 8 mm 时, 节点所能承受的极限冲切荷载增幅达到 20.97%, 当钢板厚度从 8 mm 增加到 14 mm 的过程中, 节点的抗冲切承载力每次分别提高 9.73%, 7.53%, 4.28%, 增幅逐渐减小. 当钢板厚度达到 8 mm 后, 继续提高含钢率带来的承载力增加效果将不再明显.

3) 环向法兰盘厚度. 图 9c 给出了环向法兰盘厚度  $d_f$  分别为 10, 15, 20, 25, 30 mm 时的荷载-位移曲线. 随着环向法兰盘厚度的增加, 节点的极限抗冲切承载力逐步提高. 但当厚度达到 25 mm 时, 承载力增幅从最初的每级 4% 左右降低为 1.79%. 且在法兰厚度增大的过程中, 曲线上上升段和下降段的斜率绝对值均逐渐增大, 屈服位移和极限位移相应减小, 这也意味着结构的延性有所下降.

4) 组合板混凝土强度. 图 9d 给出了混凝土强度等级为 C30, C35, C40, C45, C50 时的荷载-位移曲线. 强度等级从 C30 增加到 C50 的过程中, 节点的抗冲切承载力仅从 578.42 kN 提高到了 597.44 kN, 每级增幅不到 1%. 同时, 观察到曲线下降段的趋势随着混凝土强度等级的增加而逐渐陡峭, 延性逐渐变差. 因此可以得出结论, 采用改变组合板混凝土等级的方法并不能有效提升节点的抗冲切承载力.

5) 高强螺栓数量. 图 9e 给出了螺栓总数  $n_b$  分别为 24, 32, 40, 48 个时的荷载-位移曲线. 通过改变螺栓个数得到的 4 条节点荷载-位移曲线基本完全重合, 极限承载力的波动范围均在 0.5% 以内. 为此, 改变高强螺栓个数对外伸组合板-环向法兰连接节点的抗冲切承载力及延性的影响极小, 高强螺栓主要起固定作用, 基本不参与节点受力, 在连接设计确定螺栓个数时只需要满足规范的最小要求即可, 以便取得更佳的经济性.



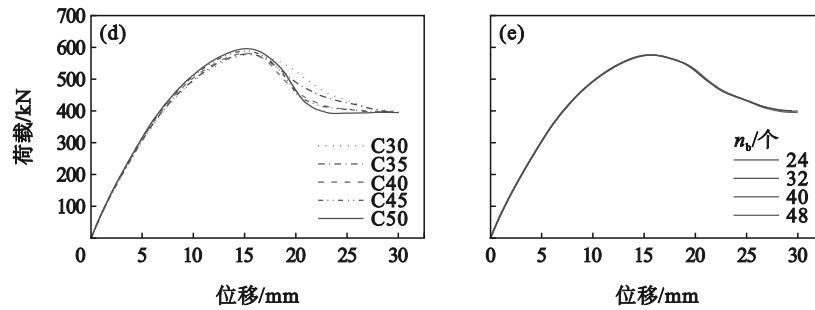


图9 预制外伸组合板-环向法兰连接节点的参数分析

Fig. 9 Parameter analysis of prefabricated cantilever slab-circumferential flange connection

(a)—组合板混凝土层厚度; (b)—组合板钢板厚度; (c)—环向法兰盘厚度;  
(d)—组合板混凝土强度; (e)—高强螺栓数量.

## 4 结 论

1) 提出了预制外环板-贯穿螺栓节点和外伸组合板-环向法兰节点的连接构造. 两种预制节点在冲切荷载作用下, 由于连接组件的存在扩大了冲切破坏的临界截面, 从而使外伸组合板-环向法兰连接节点和外环板-贯穿螺栓连接节点的抗冲切承载力较现浇节点均有较为显著的提升, 且具有较良好的延性.

2) 对于预制外环板-贯穿螺栓连接节点, 提高组合板和外环板的厚度可以使节点抗冲切承载力的每级增幅均在5%以上, 提升组合板混凝土强度等级的改善效果次之, 每级增幅不到2%. 而提高钢板与外环板的强度或增加贯穿螺栓个数对节点抗冲切性能的提升作用只在一定范围内有效. 此外, 经过计算分析建议外环板与组合板钢板的钢材牌号均取为Q345, 选择正方形或十字形的外环板并采用16个贯穿螺栓放射对称分布, 以充分发挥材料的力学性能.

3) 对于预制外伸组合板-环向法兰连接节点, 增加组合板混凝土层及钢板厚度对节点抗冲切承载力的提升效果显著, 但增幅逐渐减小, 设计时建议将组合板混凝土层和钢板厚度分别控制在130 mm和10 mm左右为佳. 而提升环向法兰厚度与组合板混凝土强度对提升节点抗冲切承载性能收效甚微, 连接螺栓主要起固定作用, 与节点承载性能无关. 综合考虑多方因素, 建议选择C30混凝土强度, 20 mm左右厚度的环向法兰, 且螺栓布置满足规范要求即可.

### 参考文献:

[1] Afefy H M, El-Tony E T M. Retrofitting of interior

slab-to-column connections for punching shear using different techniques [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2019, 33(1): 04018088.

[2] Eder M A, Vollum R L, Elghazouli A Y. Performance of ductile RC flat slab to steel column connections under cyclic loading [J]. *Engineering Structures*, 2012, 36: 239-257.

[3] Bompa D V, Elghazouli A Y. Structural performance of RC flat slabs connected to steel columns with shear heads [J]. *Engineering Structures*, 2016, 117: 161-183.

[4] 金玉, 易伟建, 胡岚, 等. 配栓钉的钢筋混凝土双向板受冲切性能试验研究 [J]. *土木与环境工程学报*, 2019, 41(3): 77-84.

(Jin Yu, Yi Wei-jian, Hu Lan, et al. Experimental analysis on mechanical performances of reinforced concrete two-way slab with studs [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(3): 77-84.)

[5] Cantone R, Ruiz M F, Bujnak J, et al. Enhancing punching strength and deformation capacity of flat slabs [J]. *ACI Structural Journal*, 2019, 116(5): 261-274.

[6] Almeida A F O, Ramos A P, Lúcio V, et al. Behavior of RC flat slabs with shear bolts under reversed horizontal cyclic loading [J]. *Structural Concrete*, 2020, 21(2): 501-516.

[7] Einpaul J, Brantschen F, Ruiz M F, et al. Performance of punching shear reinforcement under gravity loading: Influence of type and detailing [J]. *ACI Structural Journal*, 2016, 113(4): 827-838.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计标准: GB/T50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.

(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standards for design of concrete structures: GB/T50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture Press, 2024.)

[9] 张爱林, 马晓飞, 刘学春. 装配式混凝土板-钢柱新型连接节点冲切承载性能数值模拟研究 [J]. *工业建筑*, 2018, 48(5): 24-29, 36.

(Zhang Ai-lin, Ma Xiao-fei, Liu Xue-chun. Numerical simulation research on punching behavior of prefabricated RC slab to steel column new connection [J]. *Industrial Construction*, 2018, 48(5): 24-29, 36.)

[10] Zhang A L, Ma X F, Fang H, et al. Seismic behaviour of connections between prefabricated RC flat slabs and square steel tube columns [J]. *Engineering Structures*, 2018, 173: 800-812.