

# 无梁楼盖板柱节点抗冲切性能数值模拟研究

薛飞<sup>1</sup>, 郭昭胜<sup>2</sup>

(1. 中国能源建设集团安徽电力建设第二工程有限公司, 安徽合肥 230601;

2. 太原理工大学土木工程学院, 山西太原 030024)

**[摘要]**为提升无梁楼盖钢筋混凝土板柱节点的抗冲切性能,提出了内部设置抗冲切钢斗的劲性加强构造措施。通过数值模拟对比分析了普通板柱节点、抗冲切钢斗板柱节点和设置弯起钢筋板柱节点的冲切破坏极限承载力和变形性能,进一步对抗冲切钢斗钢板厚度参数进行分析。模拟分析结果显示,相比于普通的板柱节点试件,抗冲切钢斗板柱节点的冲切破坏极限承载力提升了31.1%,抗冲切钢斗钢板厚度取3mm为宜。

**[关键词]**板柱节点;抗冲切钢斗;抗冲切承载力;钢板厚度

**[作者简介]**薛飞(1978—),男,中国能建安徽电建二公司副总工程师,硕士研究生,主要从事电力行业设计、海外业务的实施。郭昭胜,太原理工大学土木工程学院副教授,博士,主要从事土木工程试验、鉴定加固。

**[DOI]** <https://doi.org/10.62662/kjxk0202001>

**[中图分类号]** TU375.2

**[本刊网址]** [www.oacj.net](http://www.oacj.net)

**[投稿邮箱]** [kjxk999@163.com](mailto:kjxk999@163.com)

无梁楼盖具有节约空间、有效增加建筑物的净高、荷载传递路线简单的优点,被广泛应用于居住区、学校、医院等区域的地下停车场或其他地下结构,但无梁楼盖板柱结构的缺点也十分明显。相对于普通的板梁柱结构,板柱结构节点的抗冲切承载安全性和稳定性明显差一些。近些年,无梁楼盖顶板坍塌破坏的事故屡屡发生,究其最根本的原因,是板柱节点的抗冲切承载力比较有限,而且发生的冲切破坏也属于脆性破坏,危险性也相对比较高。2018年,邓清对板柱结构的抗冲切性能以及极限承载力进行了研究,提出了半经验性的无梁楼盖冲切承载力计算方法。2024年,林若凯研究了配置型钢剪力架板柱节点的抗冲切性能,得出了在板柱节点区域处内置型钢剪力架可以显著提高混凝土的冲切性能,极大抑制并延缓冲切破坏下斜向裂缝的发展,并且在一定程度上可以降低脆性的冲切破坏,提升板柱节点的延性,提升抗冲切承载力。当前对板柱结构的研究还不够深入,一些问题研究不够透彻,板柱节点破坏的特征机理还不够明确,发生冲切破坏时所受载荷比较复杂。提升板柱节点的抗冲切性能一直是该课题领域的重要研究内容之一。

本文使用 ABAQUS 软件对不同构造的板柱节点的抗冲切承载力进行模拟分析,研究各参数对板

柱节点在冲切破坏下极限承载力和变形性能的影响,对板柱节点的抗冲切性能和冲切破坏受力特征进行更深入的剖析与研究。

## 一、板柱节点基本信息

本文在普通钢筋混凝土板柱节点(RC节点)的基础上,设计了抗冲切钢斗的板柱节点(GD节点),钢筋均为HPB300,钢斗材质为Q235B,混凝土抗压强度均为C30。各节点编号及主要构造参数如图1和图2所示。

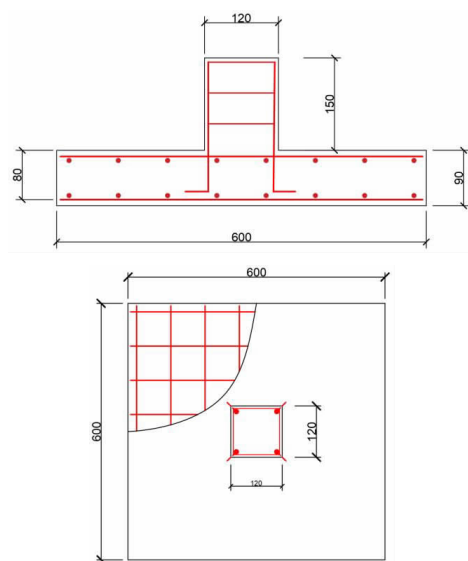


图1 RC节点尺寸详图

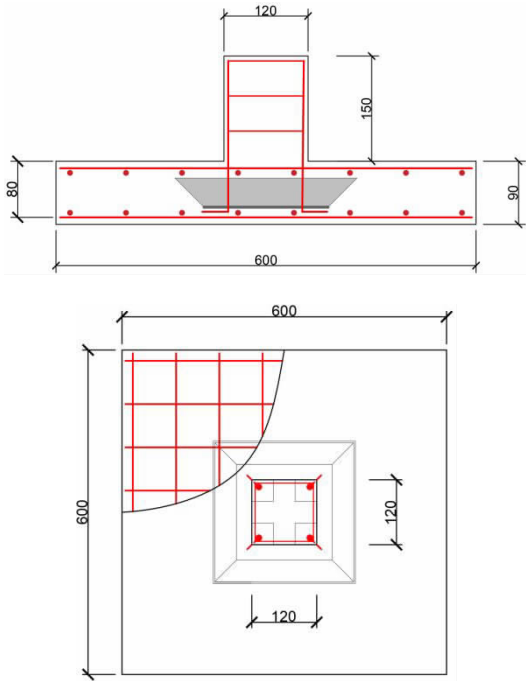


图2 GD节点尺寸详图

抗冲切钢斗钢板厚度设计为3mm,采用Q235B钢制作,钢斗底板边长为柱边长+30mm×2,即180mm,侧面与板面的夹角设置为45°。钢斗底板开孔不仅便于混凝土的浇筑振捣,还有利于加强钢斗与混凝土之间的相互锚固,抗冲切钢斗的详细尺寸如图3所示。在实际工程中,抗冲切钢斗可以通过冲压快速成型。钢斗在施工中直接绑扎固定于钢筋笼中,工艺较为简单,布置简便,不占用空间。

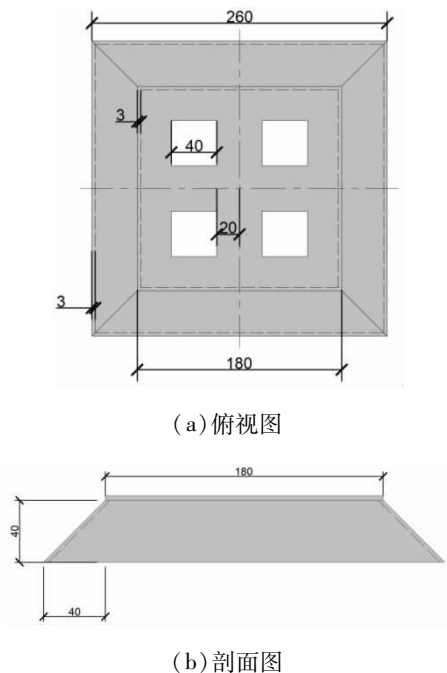
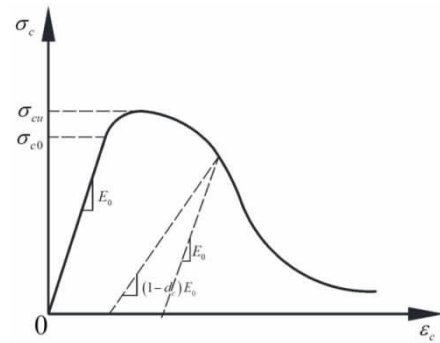


图3 抗冲切钢斗的构造详图

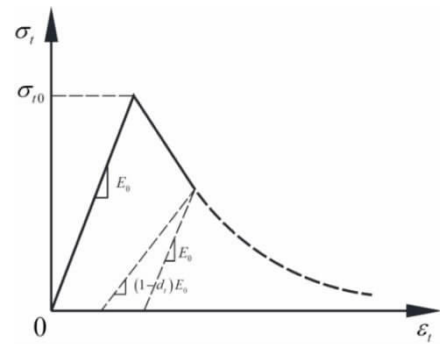
## 二、有限元建模主要参数

### (一)混凝土本构模型

在ABAQUS软件材料属性模块中选取损伤塑性模型(Concrete Damaged Plasticity)用于混凝土模拟研究。模型参数依据GB/50010-2010《混凝土结构设计规范》附录C中提供的混凝土应力应变本构关系确定,混凝土受拉、受压时的应力—应变关系如图4所示。



(a)受压



(b)受拉

图4 混凝土应力—应变关系曲线

本模拟中的相关混凝土塑性损伤参数如下表1所示。

表1 混凝土塑性损伤参数

膨胀角	偏心率	$f_{t0}/f_{c0}$	K	粘性参数
38	0.1	1.16	2/3	0.0005

### (二)钢材本构模型

此次模拟所涉及的钢筋和钢材均选用具有明显的屈服台阶的本构关系,如图5所示,其数学表达式见式(1)。

$$\begin{cases} \sigma = E_s \varepsilon_s, & \varepsilon_s < \varepsilon_y \\ \sigma = f_y, & \varepsilon_s \geq \varepsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\sigma$ —钢筋应力;  $\varepsilon_s$ —钢筋应变;  $E_s$ —钢

筋屈服前的杨氏模量;  $f_y$ —钢筋屈服应力;  $\varepsilon_y$ —钢筋屈服应变。

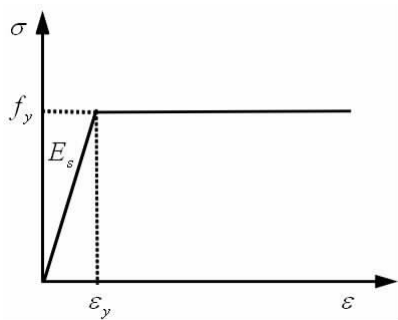


图5 有明显屈服台阶钢材应力—应变关系曲线

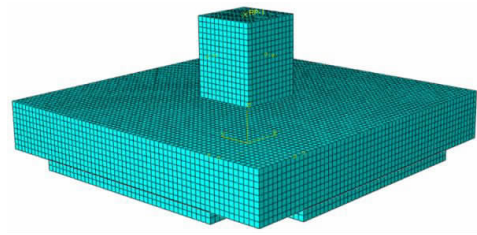
在本文的数值模拟中,依据混凝土结构设计规范,C30混凝土的杨氏模量取  $30000 \text{ N/mm}^2$ ,抗拉强度  $f_t$  取标准值  $2.01 \text{ N/mm}^2$ ,泊松比取 0.2。模型验证的立方体抗压强度取试验值;HPB300 钢筋杨氏模量取  $210000 \text{ N/mm}^2$ ,钢材的杨氏模量取  $206000 \text{ N/mm}^2$ ,钢筋和钢材的泊松比取 0.2,模型验证中钢筋和钢材的屈服抗压强度同样取试验值。

### (三) 单元的选取

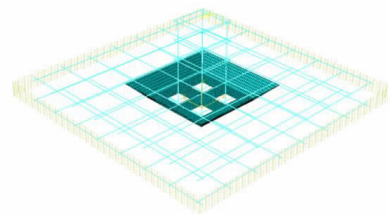
本文的组合板柱节点有限元模型中,主要包括板、柱、板筋、柱箍筋、柱纵筋和抗冲切钢斗这些部件。板柱混凝土均采用三维均质实体单元 C3D8R (八节点六面体线性减缩积分单元)。在试验中,板和柱为一次性连体现浇,所以在本文的数值模拟过程中将板和柱合并为一个整体。模型中混凝土中的板的横向钢筋、柱中的箍筋和纵筋均采用三维线单元 T3D2 (两节点线性三维桁架单元) 建立,抗冲切钢斗采用壳单元四节点减缩积分 S4R 来模拟抗冲切钢斗,采用壳单元可以定义抗冲切钢斗的厚度,且计算结果也比较精确。

### (四) 网格的划分

参考了朱宇使用 ABAQUS 软件对板柱模型网格的研究方法。经过多次试算,根据不同网格尺寸的计算结果,在相邻网格尺寸计算误差小于 3% 的情况下,确定了混凝土和钢筋网格尺寸在  $10\text{mm} \sim 20\text{mm}$  之间较为合适。抗冲切钢斗的网格尺寸为  $5\text{mm}$  较为合适。网格划分如图 6 所示。



(a) 混凝土与支座网格划分



(b) 抗冲切钢斗试件钢筋笼网格划分

图6 板柱节点有限元网格划分

### (五) 相互作用、边界条件及加载

在 ABAQUS 中模拟钢筋和混凝土之间的相互作用一般选取内置约束 (Embed), 将所有的纵筋和箍筋内置嵌入到混凝土中。抗冲切钢斗之类的钢材与混凝土共同作用的前提是二者之间具有可靠的粘结。本文忽略钢板之间的焊接时产生的残余应力和混凝土与钢筋之间的粘结滑移, 将所有的钢板合并为一个整体, 采用与钢筋相同的相互作用关系直接将抗冲切钢斗内置嵌入至整个混凝土模型之中。在有限元建模中, 将试件与上垫板建立相关模型, 将试件底部与上垫板的上表面通过绑定 (Tie) 连接, 并在圆钢棒与上垫板接触的中心线上输入相关的约束条件。垂直于 X 轴方向的两个垫板的中心线上, 约束了 Y、Z 方向的位移和绕 X 轴和绕 Z 轴的转动; 垂直于 Y 轴方向的两个垫板的中心线上, 约束了 X、Z 方向的位移和绕 Y 轴和绕 Z 轴的转动。图 7 为有限元模型的边界条件。

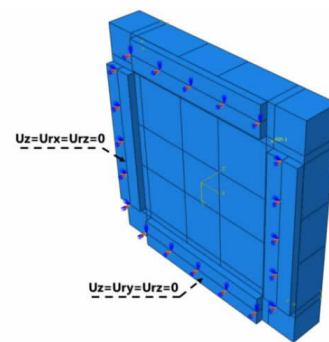


图7 有限元模型边界条件

在本文的数值模拟中选择位移加载的方式,在柱端表面中心处设置参考点 RP-1,再通过耦合 (Coupling) 约束与柱端表面连接,最后将位移荷载施加在耦合点上,使该点沿垂直于柱端表面方向位移,实现对整个板柱节点模型的均匀加载。以此获取较为完整的荷载—挠度曲线和极限承载力。图 8 为有限元模型加载。

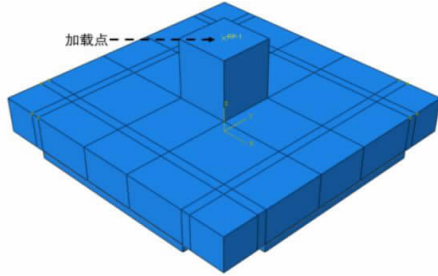


图 8 有限元模型加载

### 三、有限元模型验证

图 9 给出配置抗冲切钢斗的板柱节点 (GD 节点) 的试验和模拟荷载—挠度曲线。可以看出两种不同构造的板柱节点的试验和模拟结果的趋势大概相同,吻合比较良好,GD 节点试验和数值模拟极

限承载力分别为 113.2 kN 和 110.9 kN,二者误差 2.0%。

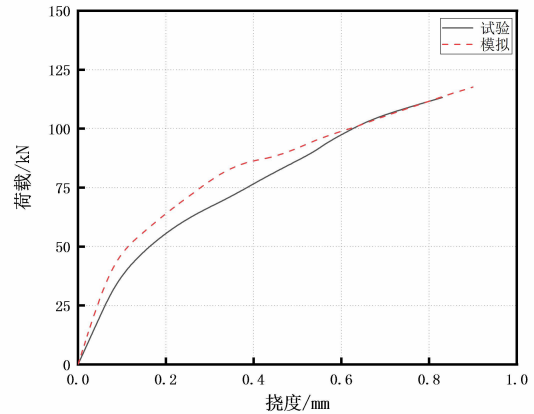


图 9 GD 节点模拟与试验荷载—挠度曲线

### 四、板柱节点参数分析结果

#### (一) 参数工况设置

通过在 ABAQUS 中建立板柱节点有限元模型并与试验结果比对,验证了此种有限元模型建立方式的正确性。抗冲切钢斗参数分析模拟工况见表 2。

表 2 抗冲切钢斗参数分析模拟工况表

试件编号	钢板厚度 /mm	板的配筋规格	板配筋率	极限承载力 /kN	提升幅度 (较普通试件 RC)	额外用钢质量/kg (较普通试件 RC)
RC	无	双层双向 A6@80	0.942%	84.6	0.0%	0.0
GD	3	双层双向 A6@80	0.942%	110.9	31.1%	1.78
GDT-1	1	双层双向 A6@80	0.942%	95.3	17.1%	0.59
GDT-2	5	双层双向 A6@80	0.942%	115.1	34.9%	2.97
GDT-3	7	双层双向 A6@80	0.942%	116.6	36.2%	4.15

注:RC 和 GD 为普通型节点和抗冲切钢斗对照试件,GDT 为不同抗冲切钢斗厚度的工况。

#### (二) 配置抗冲切钢斗试件参数分析结果

图 10 为配置抗冲切钢斗试件不同工况的荷载—挠度曲线。

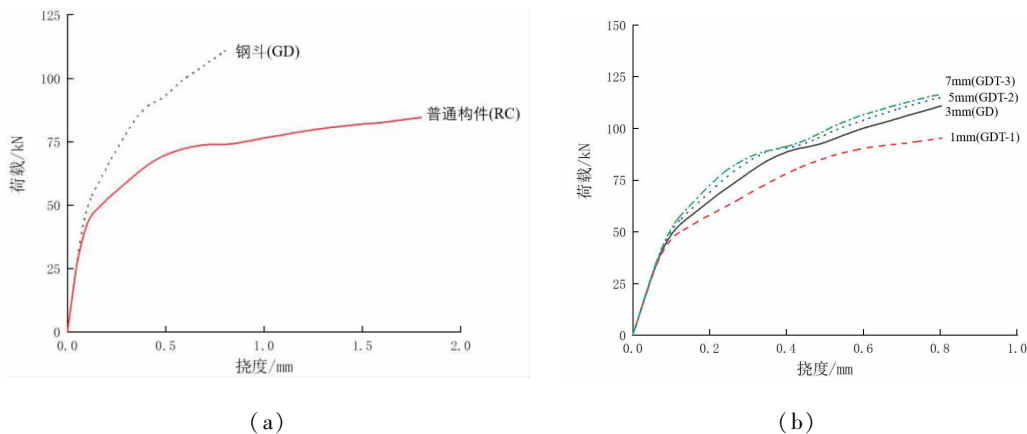


图 10 荷载—挠度曲线

图10(a)为没有配置任何抗冲切措施和普通试件与配置了厚度3mm抗冲切钢斗试件的荷载—挠度曲线,两者的曲线同样在初始的弹性阶段基本没有差别,但节点进入屈服阶段后,配置有抗冲切钢斗试件的曲线高于普通试件,普通试件的极限承载力为84.6 kN,设置抗冲切钢斗试件的极限承载力为110.9 kN,抗冲切承载力提升了约31.1%。图10(b)为配置不同钢板厚度抗冲切钢斗试件的荷载—挠度曲线。从图中可见承载力随着钢板厚度增加而增加,钢板厚度从1mm增加到3mm时,承载力提升较为明显,而钢板厚度从3mm增加到5mm以及从5mm增加到7mm时,承载力提升并不明显,说明设置3mm钢板厚度较为合适,再增加钢板厚度,承载力提升有限,但钢材损耗增加太多,从经济和承载力综合考虑,本文中模型的尺寸设置抗冲切钢斗所用钢板厚度不应超过3mm。

### 五、结论

1. 相比于普通的板柱节点,3mm厚钢板的抗冲切钢斗板柱节点冲切破坏极限承载力提升了31.1%,

提升效果较为明显。

2. 抗冲切钢斗板柱节点的钢斗钢板厚度取3mm为宜,厚度过小(1mm)对冲切破坏极限承载力提升幅度有限(仅可提升17.1%),厚度过大(5mm和7mm)时,则无法进一步明显提高冲切破坏极限承载力,且耗钢量显著增加,不够经济。

### 参考文献:

[1] 邓清. 板柱节点冲切受力性能及承载力计算方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.

[2] 林若凯,江毅,李妍,易伟文. 型钢剪力架增强混凝土板柱节点抗冲切试验研究[J]. 工程力学,2024,41(10): 156-168.

[3] 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[4] 朱宇. 施工过程中无梁楼盖结构受力分析[D]. 天津:天津大学,2022.

[5] 组合结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

## Numerical Simulation Study on Punching Shear Resistance of Stiff Slab-column Joints of Beamless Floor Cover

XUE Fei<sup>1</sup>, GUO Zhao-sheng<sup>2</sup>

(1. China Energy Engineering Group Anhui No.2 Electric Power Construction Co., Ltd., Hefei Anhui 230601;

2. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan Shanxi 030024, China)

**Abstract:** In order to improve the punching shear resistance performance of reinforced concrete slab-column joints in beamless floor systems, a reinforcement structure measure of internal punching-shear-resistant steel buckets is proposed. The ultimate bearing capacity and deformation performance of ordinary slab-column joints, punching-shear-resistant steel bucket slab-column joints, and bent steel bar slab-column joints under punching shear failure were compared and analyzed through numerical simulation. Furthermore, the thickness parameters of punching-shear-resistant steel bucket plate were analyzed. The simulation analysis results show that compared with ordinary slab-column joint specimens, the ultimate bearing capacity of the punching-shear-resistant steel bucket slab-column joint has increased by 31.1%, and the thickness of the punching-shear-resistant steel bucket steel plate should be 3mm.

**Key words:** slab-column joints; punching-shear-resistant steel bucket; punching shear bearing capacity; thickness of steel plate