

引用本文:郑山锁,杜宜阳,梁泽田,等. 钢筋混凝土板柱节点冲切性能研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(1): 52-68.

ZHENG Shansuo, DU Yiyang, LIANG Zetian, et al. Research progress of punching shear performance of reinforced concrete slab-column joints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(1): 52-68.

DOI:10.19815/j.jace.2023.06058

钢筋混凝土板柱节点冲切性能研究进展

郑山锁^{1,2}, 杜宜阳¹, 梁泽田^{1,2}, 宋积舍¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要:为提高板柱节点冲切性能从而促进其工程应用, 比较了各类抗冲切元件的不同布置形式、形状尺寸、几何参数以及组合形式对节点抗冲切承载力的影响, 概括了受损板柱节点修复与加固的研究现状, 梳理了不同开洞尺寸、距离、数量、形状及偏心荷载作用下开洞板柱试件抗冲切性能的研究成果, 归纳了有无抗冲切钢筋和配置型钢剪力架板柱节点的抗冲切承载力计算方法以及基于机器学习的板柱节点冲切承载力预测方法。结果表明: 各类抗冲切元件可通过改变布置形式、形状尺寸、几何参数以及元件组合从而改善板柱节点的冲切性能; 板件开洞的尺寸越大、距离越远、数量越多, 对节点的抗冲切性能越不利; 基于数值模拟和规范改进得出的冲切承载力计算公式仅对特定试验有较高的预测精度, 尚未形成较为统一的承载力计算公式, 而基于机器学习的冲切承载力预测模型是未来研究的重点; 需进一步开展关于受损板柱节点修复与加固方法的研究, 对完善板柱节点抗冲切性能研究理论体系具有重要意义。

关键词:板柱节点; 抗冲切元件; 抗冲切承载力; 预测模型; 开洞板柱试件; 机器学习

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2024)01-0052-17

Research progress of punching shear performance of reinforced concrete slab-column joints

ZHENG Shansuo^{1,2}, DU Yiyang¹, LIANG Zetian^{1,2}, SONG Zhihan¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;

2. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In order to improve the anti-punching shear performance of slab-column joints and thus promote its engineering application, the effects of different arrangement forms, shapes and sizes, geometric parameters and combinations forms of various types of anti-punching shear elements on the anti-punching shear bearing capacity of the joints were compared. The research status of repair and reinforcement of damaged slab-column joints was summarized. The research results on the anti-punching shear performance of slab-column specimens with openings under different openings sizes, distances, numbers, shapes and eccentric loads were sorted out. The calculation

收稿日期: 2023-06-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC1509302); 国家自然科学基金项目(52278530);

陕西省重点研发计划项目(2021ZDLSF06-10)

作者简介: 郑山锁(1960-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: zhengshansuo@263.net。

通信作者: 梁泽田(1997-), 男, 工学博士研究生, E-mail: liangzetian6@163.com。

method of the anti-punching shear bearing capacity of slab-column joints with and without the punching shear reinforcement and configuration of steel shear frame, and the prediction method of the anti-punching shear bearing capacity of slab-column joints based on machine learning were summarized. The results show that the various types anti-punching shear elements can improve the punching shear performance of slab-column joints by changing the arrangement forms, shape and size, geometric parameters and the combination of elements. The larger the size, farther the distance and more the number of openings in the slab, the more unfavorable the anti-punching shear performance of the joints. The anti-punching shear bearing capacity calculation formula based on numerical simulation and specification improvement only have high prediction accuracy for specific tests, has not yet formed uniform bearing capacity calculation formula, and the prediction model of punching shear bearing capacity based on machine learning is the focus of future research. In addition, further research on the repair and reinforcement methods of damaged slab-column joints is also of great significance for improving the theoretical system of anti-punching performance of slab-column joints.

Key words: slab-column joint; anti-punching shear element; anti-punching shear capacity; prediction model; slab-column specimen with opening; machine learning

0 引 言

板柱结构通常具有空间通畅、布置灵活、混凝土用量少和可降低建筑物层高等优点,常应用于商场、地下停车库、地下仓库等建筑物中。由于板柱节点缺乏梁,由上部结构传来的竖向荷载仅由板、柱构件承担,故板柱节点往往有易发生冲切破坏、结构抗侧刚度小和延性差等缺点,从而造成结构的连续倒塌、无征兆的脆性破坏等不可估量的工程事故。1995年,韩国三丰百货大楼突然发生坍塌,而造成事故的原因是楼顶处板柱节点在超载状态下连续破坏^[1]。2004年,瑞士 Gretzenbach 地下车库由于火灾导致板柱节点发生冲切破坏^[2]。2017年,北京市石景山区西黄村 A-E 地块地下一层车库顶板发生局部塌陷,造成本次事故的主要原因是地下一层顶板部分板柱节点处冲切承载力不满足设计规范要求^[3]。2021年,美国迈阿密公寓发生严重的连续性倒塌事故,造成该事故的原因是未精确计算板柱节点冲切承载力且未对节点采取加强措施^[4]。

为深入研究和解决板柱节点存在的问题,提高节点的冲切性能,近几十年来,国内外学者通过板柱节点冲切试验、数值模拟分析、机器学习的方法对板柱节点的冲切性能进行了大量研究。本文综合评价了各类抗冲切元件、冲切承载力预测模型、开洞板柱试件的冲切破坏性能及破坏后修复加固方法,并对后续板柱节点冲切性能研究给出建议。

1 抗冲切元件对板柱节点冲切性能的影响研究

相比于增加板厚和加大柱截面,在板柱节点配置抗冲切元件对节点的冲切性能提高更有效,本节对几种不同的抗冲切元件(箍筋和弯起钢筋、抗剪锚栓、型钢剪力架、托板和柱帽)从尺寸形状、布置形式、受力特征等方面对板柱节点冲切性能的影响进行综述。

1.1 箍筋和弯起钢筋

箍筋和弯起钢筋作为传统的抗冲切元件,近几十年来吸引了很多学者进行研究,Jang 等^[5]开展了配置不同数量抗弯钢筋和抗剪箍筋板柱节点的冲切性能试验研究并与现行规范对比,认为抗剪箍筋和抗弯钢筋的数量交互影响板柱节点抗冲切性能:当抗弯钢筋配筋率低时,增加抗剪箍筋数量对提高板柱节点抗冲切承载力有限;当抗弯钢筋配筋率大于一定值时,板柱节点抗冲切承载力随着抗剪箍筋数量的增加而增加,故当板柱节点抗冲切承载力不足时,可考虑改变抗弯钢筋的数量,而不仅是单一考虑增加抗剪箍筋。Kang 等^[6]提出了采用箍筋搭接的形式改善板柱节点冲切性能,与常规箍筋相比,搭接箍筋充分提高了板柱节点的双向抗剪强度,且在厚钢筋混凝土转换板采用搭接箍筋更便于施工。

然而,箍筋的抗冲切效率并不高,在薄板破坏时往往没有达到屈服强度^[7]。为充分利用钢筋,金玉等^[8]通过开展试验比较了普通箍筋和 U 形箍筋的

抗冲切性能,结果表明,U型箍筋在冲切承载力方面优于普通箍筋,且在节点破坏时应力达到了屈服强度,但仍无任何征兆地发生脆性破坏。

针对箍筋和弯起钢筋的布置形式,Islam等^[9]认为弯起钢筋虽然能提高板柱节点承载力,但无法明显改善节点延性,而配置封闭式箍筋能同时提高节点的抗冲切承载力和延性。舒兆发等^[10]开展的板柱节点冲切性能试验结果与文献^[9]的结果相反,认为开口式箍筋比封闭式更有利于其抗冲切。刘广义等^[11]通过开展试验比较了弯起钢筋不同弯起位置对节点冲切性能的影响,认为当弯起点离柱边太近时,弯起钢筋对抑制斜裂缝扩展和抗冲切承载力不利,并给出了弯起钢筋充分发挥作用的合理弯起位置为 $1/3h_0 \sim h_0$ (h_0 为板有效高度)。

总体来看,配置箍筋或弯起钢筋的板柱节点通常采用不同的钢筋形式来增强板柱节点的抗冲切承载力,有时改变抗弯钢筋配筋率也能提高节点承载力。由于抗剪箍筋在混凝土薄板中的应用受限,往往采取其他的抗冲切措施来提高板柱节点冲切性能。

1.2 抗剪锚栓

抗剪锚栓与箍筋相比,主要有易于安装、施工便捷、与主筋无干扰、锚固可靠和抗冲切承载力好等优点^[7,12],目前关于配置抗剪锚栓板柱节点的冲切性能研究在国内外较为广泛。

板柱节点内抗剪锚栓通常以正交和放射状布置为主^[12-16],如图1所示。张扬等^[15]开展了不同锚栓布置方式对板柱节点冲切性能的影响研究,结果表明,采用正交方式布置锚栓和放射状方式布置锚栓抗冲切承载力相差不大,且裂缝发展规律相似,但在相同承载力要求下,放射状布置锚栓所需数量少,更为经济。金玉等^[16]认为采用正交布置锚栓和放射状布置锚栓均可提高板柱节点的抗冲切承载力,但改善不明显,而提高锚栓强度和增大锚栓直径可有效改善板柱节点的冲切性能。Jiao等^[14]同样认为配置抗剪锚栓无法显著提高板柱节点抗冲切承载力,但配置放射状抗剪锚栓的板柱节点在正交方向抗剪锚栓发生冲切破坏后,斜向抗剪锚栓能继续抵抗冲切力,安全性更高。Dam等^[13]认为抗剪锚栓的正交和放射状布置均能提高板柱节点的抗冲切强度,但在节点发生破坏后的受力性能方面,放射状布置优于正交布置。然而,代伟明等^[12]则认为,相对于正交布置锚栓,放射状布置抗剪锚栓能明显提高板柱节点抗冲切承载力。研究结果均表明:正交和放射状布置抗剪锚栓均能够提高板柱节点冲切承载力,

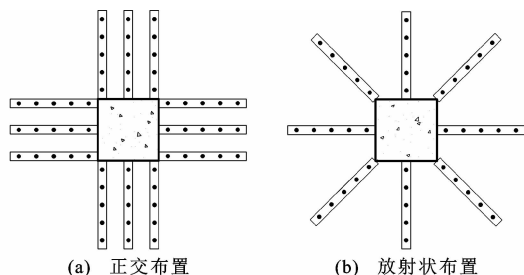


图1 抗剪锚栓布置

Fig. 1 Arrangement of shear studs

但在受力性能和经济性方面放射状布置更优越。

车文鹏等^[17]基于数值计算和参数分析对配置抗剪锚栓板柱节点的冲切性能开展研究,认为增大锚栓高度、直径、强度均能提高抗冲切承载力和延性,但提高抗剪锚栓的强度对板柱节点的冲切性能改变不明显;另外,在一定范围内减小锚栓间距能提高板柱节点的抗冲切承载力。

刘文琰等^[7]开展了配置抗冲切箍筋与抗剪锚栓板柱节点的受力性能对比试验,认为在提高抗冲切承载力方面,抗冲切箍筋与抗剪锚栓相差不大;在破坏模式方面,配置抗剪锚栓的试件有明显的弯曲破坏特征,而配置抗冲切箍筋的试件仍发生冲切破坏。王瑞^[18]通过配置不同形式的抗冲切钢筋研究板柱节点的冲切性能,认为提高抗冲切承载力优先选用抗剪锚栓和双弯曲抗剪钢筋,而在提高延性上优先选用抗剪锚栓。因此,抗剪箍筋和抗剪锚栓的选取可遵循以下原则:在板柱节点抗冲切承载力不足时,可选用抗冲切箍筋和抗剪锚栓;当需要提高板柱节点的延性时,可选用抗剪锚栓。

基于上述研究,在抗剪锚栓的布置形式方面,放射状布置锚栓不仅能使板柱节点有良好的抗冲切承载力,且在锚栓发生破坏后的安全性优于正交布置;在抗剪锚栓构造方面,加大锚栓的直径、强度和在一定范围内减小锚栓间距均可提高节点的抗冲切承载力。

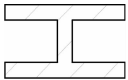
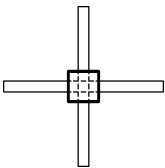
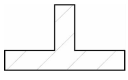
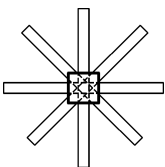
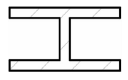
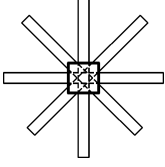
1.3 型钢剪力架

型钢剪力架是板柱节点抗冲切承载力不足时所采用的互相垂直并通过柱子截面的型钢,它与板共同受力,通过合理的设计可成为一种有效提高板柱节点冲切性能的元件。党隆基等^[19]认为与弯起钢筋相比,型钢剪力架对板柱节点极限承载力的提高效果更好。在节点设计时,可优先选择在板柱节点核心区配置型钢剪力架。

吴艺等^[20]基于ABAQUS有限元分析,比较了按十字形放置工字形、倒T形、T形型钢剪力架和

按放射状放置工字形型钢剪力架板柱节点的冲切性能。结果显示:T 形型钢剪力架由于其传力方式不恰当,未充分利用型钢,故不建议采用。其余 3 种布置形式型钢剪力架均对板柱节点的抗冲切承载力和延性有所提升,放射状布置型钢剪力架抗冲切承载力较高,倒 T 形次之,十字形最差。这也表明,将型钢剪力架均匀布置在板柱节点周围,更能有效提高其抗冲切承载力。

表 1 不同型钢剪力架布置

型钢剪力架类型	型钢截面	型钢布置方式
工字形型钢		
倒 T 形型钢(宽边朝下) T 形型钢(宽边朝上)		
工字形型钢		

Bompa 等^[21]采用有限元数值模拟,研究了配置十字形和封闭箱形剪力架板柱节点的抗冲切性能,结果表明:十字形和封闭箱形配置剪力架均可提高节点的抗冲切性能,配置十字形型钢剪力架的板柱节点传力可靠,具有良好的经济性;配置封闭箱形型钢剪力架的板柱节点由于型钢剪力架对内部混凝土存在约束作用,故可使其具备良好的冲切性能。

除不同布置方式的型钢剪力架,改变型钢剪力架腹板和翼缘板的构造也是一种提高板柱节点冲切性能的有效方法。王建平等^[22]基于 ABAQUS 有限元分析,建立了配置普通型钢剪力架、腹板开洞剪力架、肢间加强剪力架的板柱节点计算模型,结果显示:普通型钢剪力架可明显提高抗冲切承载力,腹板开洞后可以改善节点的延性,肢间加强剪力架的刚度过大,对板柱节点的延性有不利影响。樊周正等^[23]基于数值模拟分析结果认为,在一定范围内增加型钢剪力架的臂长,可提高板柱节点的抗冲切性能。Al-Abasei 等^[24]在板柱节点核心区放置钢板开展冲切试验,此时钢板可类比为型钢剪力架参与抗冲切,研究结果表明:钢板尺寸的增加能够显著提高试件的抗冲切承载力。

型钢剪力架通常对柱上板带的弯曲承载力有较大提高,为了满足“强节点弱构件”抗震设计原则,减小这种“增大效应”,杜旭^[25]提出两种有效措施:一

是减小型钢剪力架上翼缘面积,增大下翼缘面积;二是将型钢剪力架沿板厚度方向居中布置,改为贴近底部钢筋布置,如图 2 所示。如此,既不影响型钢剪力架冲切抗力,同时又能够减小型钢剪力架对柱上板带负弯矩区弯曲抗力的贡献。

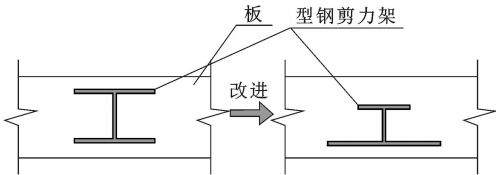


图 2 型钢剪力架优化布置

Fig. 2 Optimized arrangement of steel shear frame

此外,不同抗冲切元件通过合理的组合也可加强板柱节点的冲切性能。倪阳等^[26]设计了一种加锚栓的型钢剪力架来加强板柱节点的冲切性能,如图 3 所示,其做法是在十字形型钢剪力架腹板上横向焊接一排抗剪锚栓,抗剪锚栓与型钢剪力架共同抵抗不平衡弯矩,解决了单一腹板无法完全发挥其抗剪承载力的问题,提升了节点的承载力。林若凯等^[27]认为改变型钢翼缘和锚栓数量能够强化板柱节点内纵筋、型钢剪力架和混凝土的协同工作能力,可一定程度上提高板柱节点的抗冲切承载力和延性能力。

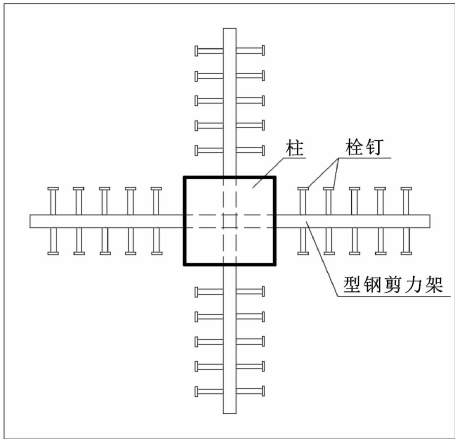


图 3 加锚栓的型钢剪力架

Fig. 3 Steel shear frame with anchor bolts

Al-Hamd 等^[28]基于 Moe^[29]提出的钢板放置于柱截面和 Hawkins 等^[30]建议使用 I 形或槽形型钢来加强板柱节点冲切承载力的方法,提出了一种新型型钢剪力架截面设计,该元件由四周的槽钢和内部的 T 形型钢焊接而成,如图 4 所示。相较于未配置型钢剪力架的板柱节点,所提出的方法可将节点抗冲切承载力提高 15%~30%,且具有良好的经济性。

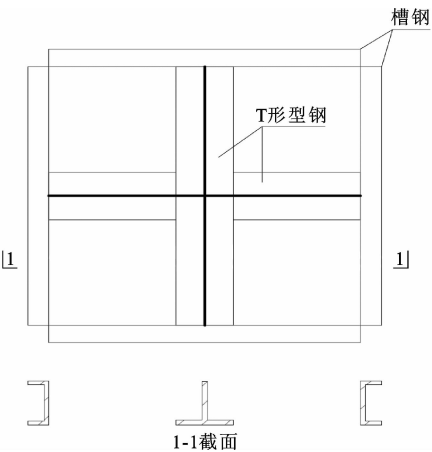


图 4 新型型钢剪力架布置形式

Fig. 4 Layout of new type of steel shear frame

Taresh 等^[31]提出了采用角钢板和抗剪锚栓组合的方式加强板柱节点的抗冲切承载力,如图 5 所示,该组合抗冲切元件将节点的冲切破坏转变为弯冲破坏。由于柱附近的混凝土被压力约束,导致破坏临界截面扩大,从而节点的抗冲切承载力和变形能力均有较大程度的提高。

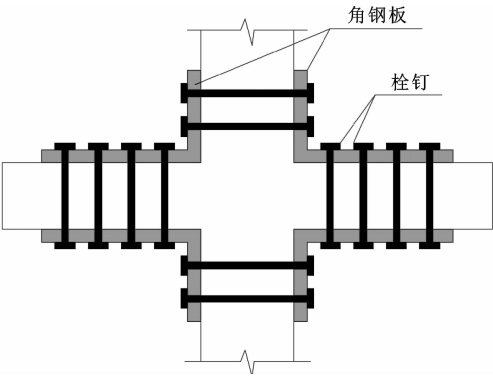


图 5 角钢板与抗剪锚栓组合

Fig. 5 Combination of angle steel plate and shear anchor bolt

综上,型钢剪力架是一种有效提高板柱节点受力性能的抗冲切元件,但配置型钢剪力架的板柱节点研究普遍停留在有限元数值分析上^[20-23],建议未来通过试验与数值模拟相结合的方法开展相关研究,从而为型钢剪力架在板柱节点中的应用提供理论依据。

1.4 柱帽和托板

童亿力等^[32]通过开展配置 4 种不同柱帽形式(图 6)的板柱节点抗冲切试验与 ABAQUS 有限元分析结果对比发现,45°单倾角和 90°托板柱帽布置形式板柱节点的抗冲切承载力最好。Jasim 等^[33]进行了配置斜柱帽的板柱节点受轴向和偏心荷载作用

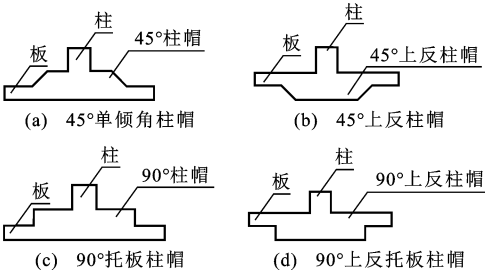


图 6 不同布置形式的柱帽

Fig. 6 Column caps with different arrangements

的抗冲切试验,结果表明:无论是受轴向或偏心荷载,节点的抗冲切承载力随着柱帽宽度增加都有较大的提升。这是由于柱帽与板的接触面积增加,扩大了节点破坏临界截面,从而提高了节点的抗冲切效率。

王焱等^[34]对不同柱帽角度、柱上板带箍筋、柱帽箍筋和柱帽与楼板相对位置的板柱节点受力性能进行数值分析,结果表明:与垂直柱帽相比,斜柱帽可提高板柱节点的极限承载力和刚度,改善节点的变形能力;与上反斜柱帽相比,普通斜柱帽虽能提高节点的极限承载力,但延性更差。王璐等^[35]基于文献^[36]提出了一种采用钢板、槽钢、锚栓组合形式的钢柱帽,与传统柱帽相比,该组合柱帽具有节约成本、方便施工的优点,且可提高节点的抗侧刚度、变形能力及耗能能力。

李伊晨等^[37]开展了配置托板板柱节点的冲切性能试验,认为托板增加了板柱节点处板的有效高度,可显著提升节点极限冲切强度但无法改善节点的延性。

综上,斜柱帽对板柱节点抗冲切承载力提高较为明显,其次柱帽的材料、布置方式、与其他抗冲切元件组合等方法也可有效改善节点的冲切性能。

1.5 抗冲切元件修复受损板柱试件

由此可见,关于通过不同抗冲切元件提高板柱节点的抗冲切性能研究较为广泛,然而目前对于修复受损板柱节点的研究较少。为减轻损伤后的板柱节点进一步发生破坏,开展节点损伤修复及加固方法的相关研究以提高受损板柱连接的冲切性能具有重要意义。如今较为主流的修复方法为碳纤维(CFRP)布加固法。Silva 等^[38]进行了 CFRP 布加固受损板柱节点的研究,认为 CFRP 布能显著恢复节点的冲切承载力,且在板临界截面的受拉面上径向、双层布置 CFRP 布对冲切性能的恢复最有效。Gherdaoui 等^[39]认为 CFRP 布对不同受损程度的板在冲切极限荷载和挠度方面有不同程度的提高。

El-Sayed 等^[40]比较了 CFRP 钢筋、玻璃纤维(GFRP)钢筋、钢链板修复受损板柱节点的冲切性能,发现 3 种方法均可有效修复节点,其中 CFRP 钢筋对节点的冲切承载力和刚度有较大提升,是最有效的修复材料。

当板柱节点损伤到一定程度时,也可通过在柱周围增加抗剪锚栓来修复板件。Askar^[41]采用预应力竖向抗剪螺栓修复损伤节点,并对修复后板柱节点的承载能力、开裂行为和变形特性进行分析发现,修复后板件的承载能力显著提高,开裂荷载几乎接近了破坏荷载,这种修复效率随着预应力竖向抗剪螺栓数量的增加而提高。Ammash 等^[42]通过在节点四周布置钢加劲肋来修复受损后板柱节点,认为增加钢加劲肋的尺寸和数量可增加冲切临界截面周长,即可有效恢复受损节点的冲切承载力。

1.6 小 结

综上,各类抗冲切元件对板柱节点的冲切性能有不同程度的改善,其中抗剪锚栓和型钢剪力架对板柱节点的抗冲切承载力和延性的提高效果较好;抗剪箍筋和柱帽通过合理的布置形式也能达到理想的效果。对于配置抗剪箍筋的板柱节点,破坏模式仍为无明显征兆的冲切破坏,尚需研究更合理的布置形式从而提升节点的延性,避免其发生脆性破坏;对于配置型钢剪力架的板柱节点,多数研究仍停留在有限元数值分析层面,建议开展配置型钢剪力架板柱节点的冲切试验,完善型钢剪力架冲切数据库,为板柱节点型钢剪力架设计方法研究提供依据,从而提高型钢剪力架在板柱节点中的应用。另外,抗冲切元件对板的承载力有一定“增大效应”,为实现“强节点弱构件”的抗震设计原则,建议通过更合理的抗冲切元件设计进行优化。

2 开洞板柱试件的研究

靠近柱的洞口会减少开洞板柱节点抵抗冲切所需的混凝土量,且板中纵向钢筋被截断,从而会降低此类板柱节点的抗冲切承载力。然而,在某些情况下,由于开洞导致节点的冲切强度降低是不可避免的,故进行开洞造成的应力重分布规律研究对准确估计开洞板柱节点的冲切强度具有重要意义。

2.1 开洞板柱试件的试验研究

开洞的尺寸、位置、数量是影响开洞板柱试件节点冲切承载力的主要因素。Liberati 等^[43]开展了不同开洞数量、开洞尺寸对板柱节点冲切性能影响的试验研究,结果表明:与无开洞的板件相比,具有两

个开洞(对称于柱两边)的平板抗冲切承载力降低了 16%,具有 4 个开洞(正交于柱)的平板抗冲切承载力减少了 23.2%;节点的耗能能力随着开洞尺寸的增加而降低。Akkaya 等^[44]进行了钢筋混凝土双向板-柱结构中不同开洞尺寸和开洞位置(平行、对角和相邻)的冲切性能研究发现,随着开洞尺寸的增加,节点的极限承载能力和耗能能力显著降低并且最不利的开洞位置为相邻开洞和平行于柱开洞。Mercimek 等^[45]同样认为,相邻开洞对节点的冲切承载力最不利。El-Shafiey 等^[46]开展了不同开洞尺寸、位置和形状对板柱节点冲切性能的影响。结果表明:带有开洞的混凝土板的抗冲切承载能力大幅降低,且随着开洞尺寸的增加而增加,而随着开洞和柱之间距离的增加而减少。此外,与方形开洞相比,圆形开洞抗冲切承载能力更好;在挠度方面,对于无开洞的板,沿板中心线柱的两侧挠度分布对称,而对于带有开洞的板,含开洞侧的挠度高于另一侧。开洞的设计参数如图 7 所示,其中 B 为方形截面开洞宽度, D 为圆形截面开洞直径, X 为开洞与柱的距离, B 取 100、200、300 mm, D 取 250、350、450 mm, X 取 100、200、300 mm。

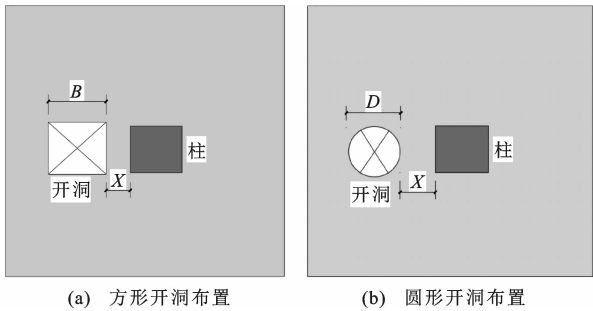


图 7 不同形状开洞布置

Fig. 7 Arrangement of different shape openings

有学者认为,节点的抗冲切承载力主要受临界截面范围内开洞数量和开洞尺寸的影响,Ha 等^[47]进行了以开洞位置和数量为变量的板柱节点抗冲切试验,结果表明:当平行于柱边向外方向布置开洞时,由于开洞均在临界截面附近,故增加开洞数量会明显降低节点抗冲切承载力;当垂直于柱边向外方向布置若干开洞时,由于部分开洞远离临界截面,故增加开洞数量对节点冲切承载力几乎无影响;当沿柱角 L 形分布开洞时,会大幅降低板冲切承载力。Augustin 等^[48]提出用开洞宽度的直线投影减少控制临界截面范围的计算模型从而预测开洞板柱节点的抗冲切承载力。该方法能较为精确地预测在柱侧对称布置开洞的板柱节点抗冲切承载力,但采用该

模型预测不同开洞位置(柱角开洞、非对称开洞、连续开洞等)板柱节点抗冲切承载力仍需进一步研究。

此外,偏心荷载也会对板柱节点抗冲切承载力造成一定的影响。Bursac 等^[49]开展了偏心荷载作用下开洞板柱节点的抗冲切性能试验研究,结果表明:偏心荷载作用在开洞板异侧时的板柱节点冲切强度比偏心荷载作用在开洞板同侧时的冲切承载力高约 18%。

2.2 开洞板柱试件的数值模拟研究

国内外学者通过数值模拟方法开展了大量关于开洞尺寸、数量、位置以及偏心荷载对板柱节点冲切性能的影响研究。Balomenos 等^[50]基于有限元模拟分析了不同开洞尺寸和开洞位置对板柱试件抗冲切承载力的影响,认为距离柱表面 $4d$ (d 为柱的宽度)的任何大小的开洞与没有开洞的板件抗冲切承载力几乎相同,这也表明在特定的开洞距离下,开洞尺寸对板柱节点的抗冲切承载力影响可忽略。此外,作者还提出,对于开洞板柱连接的抗冲切性能研究不仅可采用有限元数值模拟,还可利用概率研究的方法进一步补充试验细节。Anl 等^[51]研究了不同开洞位置和尺寸对钢筋混凝土双向板抗冲切性能的影响,结果表明:采用数值模拟分析得到的开洞板柱节点的抗冲切承载力结果与采用规范的计算结果相比存在一定误差,开洞尺寸大、离柱较近、按对角布置开洞的试件误差最大。

Mostofinejad 等^[52]基于有限元分析了不同尺寸和位置的开洞对板柱节点冲切性能的影响,结果表明,增加开洞的尺寸和减小开洞与柱的距离会显著增加板柱节点的剪切应力;开洞对增加内部板柱连接处剪切应力的影响大于边缘板柱连接处,并且最大剪切应力总是发生在距离柱 $d/2$ 界面处,它既不受洞口参数变化的影响,也不受连接类型(内部柱或边缘柱)的影响。

Zivkovic 等^[53]基于 ABAQUS 有限元数值模拟分析了偏心荷载和不同开洞距离对板柱节点冲切性能的影响,结果表明:即使较小的偏心荷载也会显著影响无开洞板的冲切承载力,而开洞会进一步减小节点的冲切承载力;随着开洞距离增加,对节点的冲切承载力降低程度也减小;当开洞与柱的距离大于 $6d$ 时,可忽略开洞对节点冲切承载力的影响。然而,更多学者^[54-55]进行的板开孔效应研究中则认为开洞与柱的距离大于 $4d$ 时,即可忽略开洞对节点冲切承载力的影响。

Alrousan 等^[56]通过理论分析和数值模拟研究

了偏心荷载作用下开洞板柱节点冲切性能,认为在不同偏心荷载下,平板的裂缝、极限承载力和混凝土抗压强度之间存在线性关系,且这种线性关系随混凝土强度的提高而更精确。此外,若开洞位于偏心荷载的同侧,则开洞同侧板的弹性刚度增加 5%,而开洞异侧板的弹性刚度则减少 8%;塑性刚度在开洞的情况下最多减少 34%,在荷载偏心时最高下降 77%。

此外,Milligan 等^[57]基于有限元数值模拟开展了开洞板-异形柱节点的冲切性能研究,结果表明:对于板-L 形柱,开洞应避免布置在柱的外边缘,尤其是两个外边缘共用顶点附近处;对于板-T 形柱,开洞布置在长边外缘时抗冲切承载力最低;对于板-十字形柱,在短边布置开洞时易发生冲切破坏,但该形状荷载传递效率最高。各板-异形柱最不利开洞位置如图 8 所示。

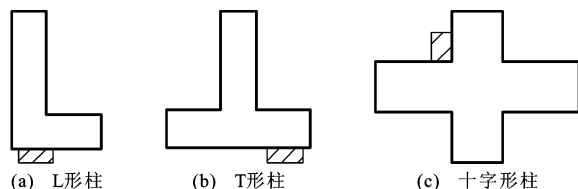


图 8 板-异形柱最不利开洞位置

Fig. 8 Most unfavorable openings position of slab-special shaped column

2.3 开洞板柱试件的加固方法

目前应用较为广泛的加固开洞板柱试件的材料主要有高强度的混凝土和 CFRP 钢筋。Yousef 等^[58]开展了全尺寸高强度钢筋混凝土(HSC)和普通强度混凝土(NSC)开洞板柱内节点的冲切性能试验,结果表明:高强度混凝土可有效提高开洞板的抗冲切承载力但同时也降低了试件的延性。El-Mandouh 等^[59]进行了全尺寸普通强度混凝土(NSC)和高强度轻质混凝土(HSLWC)板边柱连接节点的冲切性能试验,结果表明 HSLWC 能够较好地提升不同开洞尺寸和开洞位置的板柱试件抗冲切承载力,当开洞尺寸为板带长度的 $1/8$ 且沿柱边缘布置时,节点承载能力提高最明显。

EL-Mandouh 等^[60]开展了 CFRP 钢筋加固开洞高强混凝土板柱连接试件的研究,结果表明:CFRP 钢筋加固开洞板柱试件时可有效减小裂缝宽度,且对板件裂缝发展模式有显著影响,但开洞在柱边的板加固后破坏模式仍为冲切破坏;CFRP 钢筋可提高开洞距离柱 $2d$ 或 $3d$ 试件的冲切强度和延性,但对开洞在柱边的试件提高不明显。Oukaili

等^[61]进行了开洞钢筋混凝土泡沫板冲切性能和 CFRP 布加固节点试验研究,结果表明 CFRP 加固开洞可提高泡沫板的抗冲切承载力和刚度。加固布置方法如图 9 所示。

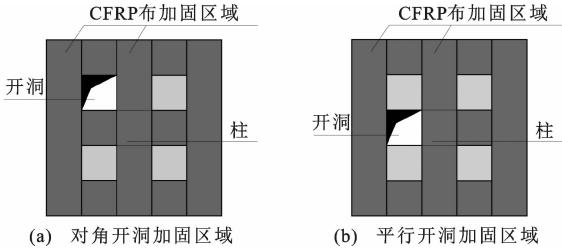


图 9 CFRP 布加固方法

Fig. 9 Reinforcement method of CFRP sheet

2.4 小结

大多数学者通过有限元数值模拟和试验分析进行开洞板柱试件冲切性能的研究,形成较为统一的认识:开洞尺寸越大、数量越多、离柱越近,节点的抗冲切承载力越低;偏心荷载对开洞板柱试件的冲切承载力影响较大;相邻开洞为最不利的开洞位置。然而,在可忽略开洞对板件的影响上未形成统一的结论,但多数学者认为开洞距离柱大于 $4d$ 时即可忽略开洞对抗冲切承载力的影响。除此之外,Ha 等^[47]认为在临界截面内的开洞对节点的抗冲切承载力起主要影响,而不仅是开洞与柱的距离。

为加强开洞板柱试件的抗冲切承载力和修复受损开洞板件,可采用高强度混凝土和 CFRP 钢筋对洞口局部或板件进行抗冲切加固。

3 板柱节点抗冲切承载力研究

通过对板柱节点受力机制进行分析,探明节点内力分布特征,基于试验和有限元分析手段得到节点抗冲切承载力计算方法,以及基于大数据分析技术预测板柱节点的承载能力,对于推广板柱节点在实际工程中的应用具有重要意义。

3.1 板柱节点冲切破坏模式

目前,国内外现有规范对板柱节点冲切破坏模式的界定并未形成统一认识,各预测模型的冲切承载力计算公式所采用的破坏理论不同,所考虑的参数以及各参数对板柱节点抗冲切承载力的贡献也不同。多数学者认为,在板柱节点发生冲切破坏前,节点已发生了部分弯曲破坏,破坏模式具有弯曲破坏和冲切破坏双重特征。樊健生等^[62]将板柱节点破坏后形成冲切锥体定义为冲切破坏,将形成塑性铰的破坏模式定义为弯曲破坏,而兼具上述两种特征

的破坏模式定义为弯冲破坏。

王安宝等^[63]采用屈服线理论计算板柱节点弯曲承载力 q_w ,采用理想刚塑性破坏模型计算其冲切承载力 q_c ,并将两者的比值 φ 定义为弯曲破坏和冲切破坏的界限[式(1)],当 $\varphi < 1$ 时为弯曲破坏,当 $\varphi = 1$ 时为界限破坏,当 $\varphi > 1$ 时为冲切破坏。

$$\varphi = \frac{q_w}{q_c} \quad (1)$$

$$q_w = k \frac{M_u + M'_u}{L^2} \quad (2)$$

$$q_c = 4f_t h^2 \left(\frac{d}{h} + K \right) / \{ L^2 [1 - (\lambda + 2K \frac{h}{L})^2] \} \quad (3)$$

式中: k 为弯曲破坏机构的承载力系数; M_u 、 M'_u 为单位宽度板抵抗正负弯矩的抗弯能力; L 为板件 X 、 Y 方向边长; f_t 为混凝土抗拉强度; h 为板厚; K 为与材料性能有关的系数; $\lambda = d/L$ 。

曹明等^[64]将板柱节点发生冲切破坏的同时或稍后发生弯曲破坏定义为节点的弯冲界限破坏,此时板内纵筋配筋率 ρ 为界限配筋率,用 ρ_b 表示。当 $\rho < \rho_b$ 时,节点发生弯曲破坏;当 $\rho > \rho_b$ 时,节点发生冲切破坏。 ρ_b 计算式为

$$\rho_b = \frac{f_c (0.123 - 0.088\eta_1 + 0.888\eta_2)}{f_y} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= 2.2 - 0.204(2a + \pi h)\lambda/l_0 \\ \eta_2 &= 0.068(2a + \pi h/2)\lambda/l_0 \\ \lambda &= (l_0 - a)/2h_0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: f_c 为混凝土抗压强度; f_y 为钢筋屈服强度; a 为柱截面尺寸; l_0 为板跨度。

吴强等^[65]基于等代梁法提出了板柱节点抗弯承载力计算式,并根据该计算式给出了中柱节点破坏形态的判别方法:当临界截面剪应力传递的弯矩 $M_{umb,y}$ 小于等于临界截面弯曲传递的弯矩 $M_{umb,f}$ 时,节点发生冲切破坏,反之节点发生弯曲破坏。 $M_{umb,y}$ 计算式为

$$M_{umb,y} = \{1 - 1/[1 + \frac{2}{3}\sqrt{(h_c + h_0)/(b_c + h_0)}]\} M_{umb,f} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{umb,f} &= 2(M_y - M_g) \\ M_y &= f_v A_s t_0 (1 - 0.5\rho_s \frac{f_y}{\alpha_1 f_c}) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: h_c 为柱截面高度; h_0 为板有效厚度; b_c 为柱截面宽度; M_y 为计算宽度内等代梁的屈服弯矩; M_g 为竖向荷载在计算宽度内板上产生的支座截面弯矩; f_v 为钢筋抗剪强度设计值; A_s 为等代梁中受拉钢筋的截面面积; t_0 为板的有效高度; ρ_s 为等代梁的

受拉钢筋配筋率。

式(6)仅适用于中柱节点破坏模式判别,对于边柱和角柱节点的破坏模式预测仍需拓展。

Xiao 等^[66]通过分析板柱节点发生破坏时荷载-挠度关系、混凝土和钢筋的屈服强度、开裂模式及试验值与计算值的比值,得出了节点破坏模式的判别方法[式(8)],当 $\phi_{\text{FMC}} < 115$ 时为弯曲破坏,当 $115 \leq \phi_{\text{FMC}} \leq 185$ 时为弯冲破坏,当 $\phi_{\text{FMC}} > 185$ 时为冲切破坏。

$$\phi_{\text{FMC}} = \frac{A_s^2 f_y d}{80 C u f_t^{1.25}} \quad (8)$$

式中: P_{punch} 为计算所得冲切力; P_{flex} 为计算所得弯曲荷载; C 为柱的平移倍数或宽度; u 为控制截面周长,圆形截面时 $u = R + 3d$,方形截面时 $u = r + 3d$; f_t 为混凝土抗拉强度, $f_t = 0.42 \sqrt{f_{cu}}$,其中 f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度设计值。

式(8)在后续蔡怡晴等^[67]研究中,通过 196 组板柱节点冲切试验的试验数据进行了验证,结果表明,该式能够较精确判别板柱节点的破坏模式。

3.2 有无抗冲切钢筋板柱节点抗冲切承载力计算

卢昱成等^[68]对 GB 50010—2010 中未配置抗冲切钢筋的板柱节点抗冲切承载力公式进行改进,得到了超高韧性水泥基复合材料(UHTCC)-混凝土组合板柱节点两种不同破坏模式(图 10)下的抗冲切承载力 V_{u1} 、 V_{u2} 计算公式。

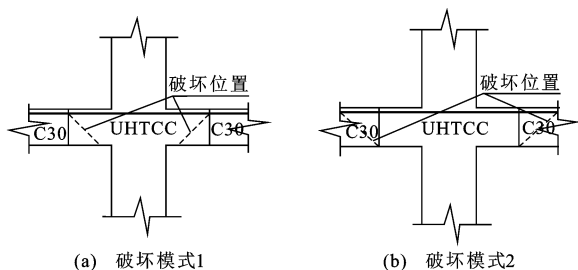


图 10 不同破坏模式

Fig. 10 Different failure modes

破坏模式 1: 破坏斜裂缝始于板柱交界, V_{u1} 为

$$V_{u1} = 2.8 \beta_h \eta f_{t,u} (b + h_0) h_0 \quad (9)$$

式中: $f_{t,u}$ 为 UHTCC 抗拉强度试验值; b 为柱宽; h_0 为板有效高度; β_h 为截面高度影响系数; $\eta = \min\{0.4 + 1.2/\beta_s, 0.5 + \alpha_s h_0/4u_m\}$, β_s 为荷载或反力作用形状为矩形时的长宽比值, α_s 为柱位置影响系数,中柱取 40,边柱取 30,角柱取 20, u_m 为临界截面周长。

破坏模式 2: 破坏斜裂缝始于两种材料交界, V_{u2} 为

$$V_{u2} = 2.8 \beta_h \eta f_t (W + h_0) h_0 \quad (10)$$

式中: W 为 UHTCC 材料使用范围宽度。

取式(9)和式(10)计算所得节点的冲切承载力较小值[式(11)],该值即为 UHTCC-混凝土组合板柱节点极限冲切承载力。

$$V_u = \min\{V_{u1}, V_{u2}\} \quad (11)$$

通过比较抗冲切承载力改进式计算结果与有限元分析结果发现,两者具有较好的一致性,这说明改进式能够较精确地预测板柱节点的抗冲切承载力,但此类方法受到试验参数的影响,存在一定的局限性。

Muttoni^[69]提出临界剪切裂缝理论并分析了无腹筋梁的抗剪机理,认为可将板的抗冲切行为类比为无腹筋梁的抗剪行为。夏成亮等^[70]将无抗冲切钢筋板柱节点的冲切破坏类比为梁的剪压破坏,根据修正压力场理论,得到无抗冲切钢筋板柱节点抗冲切承载力公式,即

$$V_u = 2f'_c ch_c \left(\frac{h_s}{h_c}\right)^2 + \frac{0.36 \sqrt{f'_c}}{0.31 + 24\omega/(a_g + 16)} \cdot [2c + 2(h - h_0) \cot(\theta)](h - h_s) \quad (12)$$

式中: h_s 为剪压区高度; h_c 为受压区高度; θ 为临界斜裂缝倾角; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; c 为柱截面尺寸; a_g 为混凝土材料的最大骨料粒径; ω 为钢筋混凝土开裂单元的平均裂缝宽度。

赵晋等^[71]基于对样本的回归分析,提出了无腹筋板柱节点抗冲切承载力 V_p 的计算公式,即

$$V_p = 3f_c^{1/3} \rho^{1/2} u_m h_0 \quad (13)$$

由于在实际工程中,板柱节点周围的约束对抗冲切承载力也有一定的贡献,故采用式(13)计算得到的结果较为保守。

Rankin 等^[72]基于 217 个板柱节点冲切试验数据,结合板深度系数对混凝土强度、钢筋配筋率和钢筋屈服强度进行修正,改进了板柱节点抗冲切承载力公式。

对于方柱,抗冲切承载力 P_{vs} 为

$$P_{vs} = 1.37 f_c^{0.45} (c + d) d (100\rho)^{0.2} f_y^{0.05} \left(\frac{200}{d}\right)^{0.18} \quad (14)$$

对于圆柱,抗冲切承载力 P_{vs} 为

$$P_{vs} = 1.25 f_c^{0.45} (\phi_c + d) d (100\rho)^{0.2} f_y^{0.05} \left(\frac{200}{d}\right)^{0.18} \quad (15)$$

式中: c 为方柱边长; ϕ_c 为圆柱体直径; d 为板的有效深度; ρ 为钢筋平均配筋率。

党隆基等^[73]以 187 个冲切试验数据为样本,通

过线性回归分析得到冲切承载力 V_{T1} 为

$$V_{T1} = (0.83 + 0.176 \times 100\rho) u_m f_t \quad (16)$$

式中: ρ 为板配筋率; u_m 为计算截面的周长。

考虑到混凝土峰值应力和钢筋屈服状态的抗力效应不能同步变化, 将(16)式乘 0.85 的折减系数得 V_{T2} 为

$$V_{T2} = (0.706 + 15\rho) u_m f_t h_0 \quad (17)$$

该计算方法兼顾了结构的安全性和经济性, 可为板柱节点抗冲切设计提供参考。

邓清^[74]对板柱节点应变特征、应力场特征、斜裂缝等关键因素进行分析, 得出了半经验性的板柱节点抗冲切承载力 V_c 计算式, 即

$$V_c = 3.25(f_c)^{0.5} x_c (R + 1.6x_c) + 0.7(f_c)^{0.5} / [0.31 + \frac{24\Psi(h_0 - x_c)}{a_g + 16}] (h_0 - x_c) [R + 1.6(h_0 + x_c)] \quad (18)$$

式中: x_c 为极限状态时的混凝土受压区高度; R 为圆柱截面直径, 与方柱截面换算时 $R = 1.2 \sqrt{c_1 c_2}$, c_1 、 c_2 为方柱截面边长; Ψ 为极限状态时的板体转角。

式(18)的优点在于可充分反映出混凝土强度和纵筋配筋率对板柱节点抗冲切承载力的影响, 且该式与欧洲规范 Eurocode 2-04 公式计算结果相近, 有较好的精确度。

Jang 等^[5]对比了规范 ACI 318 和 KCI 2012 中的抗冲切公式, 并对 KCI 2012 中板抗冲切公式进行修改, 提出了考虑板柱节点周围纵筋影响的抗冲切强度公式, 即

$$V_{n, KCI(modified)} = V_c + 0.5\alpha V_s \quad (19)$$

式中: $V_{n, KCI(modified)}$ 为板柱节点考虑纵筋配筋影响的抗冲切强度; V_c 为混凝土抗剪强度; V_s 为抗剪钢筋的抗剪强度; α 为抗弯钢筋对抗剪箍筋的抗冲切强度影响系数。

α 取值为

$$\alpha = \begin{cases} \frac{0.65}{0.007}(\rho - 0.007) + 0.35 & 0.007 < \rho < 0.014 \\ 1 & \rho \geq 0.014 \end{cases}$$

然而, 该改进式仅在板对称配筋条件下轴心受荷时具有较高的精度, 在偏心受荷或侧向受荷时仍需进一步研究。

孙俊豪等^[75]基于抛物线形库仑-莫尔破坏准则, 并运用虚功原理建立了考虑混凝土、钢筋的贡献及钢筋销栓作用的抗冲切承载力 P 计算公式, 即

$$P = 0.068 f_c (dh + 1.36h^2) + 0.936 \sqrt{f_c f_y} (dh_0 +$$

$$2.720 7h_0^2) \rho + 0.480 f_y (dh_0 + 2.720 7h_0^2) \rho \quad (20)$$

式中: 第 1 项为混凝土部分提供的承载力; 第 2 项为钢筋销栓作用提供的承载力; 第 3 项为钢筋拉应力提供的承载力。

3.3 配置型钢剪力架板柱节点的抗冲切承载力

配置型钢剪力架的板柱节点存在两个显著问题: ①板柱节点配置型钢剪力架后, 柱上板带抗弯承载力有明显提高, 这可能违反“强节点弱构件”的抗震设计原则; ②配置型钢剪力架板柱节点没有明确的直剪设计方法。杜旭^[25]认为梁-柱节点与板-柱节点直剪行为和受力机理相近, 对《装配式混凝土结构技术规程》^[76]中梁-柱节点直剪公式进行改进, 得出了板-柱节点直剪承载力公式, 即

$$V_u = 0.07 f_c A_{cl} + 1.65 A_{sd} \sqrt{f_c f_y} \quad (21)$$

式中: V_u 为直剪承载力设计值; A_{cl} 为潜在直剪面面积; A_{sd} 为穿过直剪面的钢筋总横截面面积; f_y 为垂直穿过潜在直剪破坏面的钢筋抗拉强度设计值。

周理等^[77]将配置型钢剪力架板柱节点的抗冲切承载力分为两部分, 一部分为柱贡献的承载力, 另一部分为型钢剪力架贡献的承载力, 并给出十字形和 X 形布置型钢剪力架板柱节点的抗冲切承载力计算式。

按十字形布置型钢剪力架时

$$F_c = 0.7 \beta_h f_t \eta u_c h_0 \quad (22)$$

$$u_c = 4b \quad (23)$$

$$F_b = 0.7 \beta_h f_t \eta u_b h_0 \quad (24)$$

$$u_b = 8x_1 \quad (25)$$

式中: F_c 为柱贡献项; F_b 为型钢贡献项; u_c 为柱影响区冲切计算截面周长; u_b 为型钢剪力架影响区计算截面周长。

按 X 形布置型钢剪力架时

$$u_c = 4b - 4(\sqrt{2} - 1)h_0 \quad (26)$$

$$u_b = 8x_2 \quad (27)$$

式中: x_1 、 x_2 通过建立型钢端部屈服时的平衡公式求解。

因此, 配置型钢剪力架板柱节点的极限抗冲切承载力 F_{total} 为

$$F_{total} = F_b + F_c \quad (28)$$

樊周正等^[23]通过对 75 组内置型钢剪力架方钢管板柱节点进行有限元模拟, 考虑了型钢剪力架长度、腹板面积等因素, 对规范^[78]中抗冲切公式进行改进, 得到了型钢剪力架板柱节点抗冲切承载力 F_1 推导公式, 即

$$F_1=0.835f_t\eta\mu_mh_0+0.577\frac{l}{\mu_m}(\frac{h_0}{h_s})^{0.018}A_sf_{vy}\quad(29)$$

式中： l 为型钢剪力架的臂长； h_s 为型钢剪力架的腹板高度； A_s 为型钢剪力架的腹板面积； f_{vy} 为型钢的抗剪强度； h_0 为板的有效高度； μ_m 为计算截面周长。

林若凯等^[27]基于现有规范通过理论分析对板柱节点冲切承载力公式进行修改，建议板柱节点抗冲切承载力 V_T 可按式(30)计算。

$$V_T=V_c+V_r+V_s\quad(30)$$

式中： V_c 为混凝土抗冲切承载力； V_r 水平钢筋抗剪承载力； V_s 为型钢剪力架抗剪承载力。

V_c 可按中国规范^[78]或美国规范 ACI 318-08^[79]中抗冲切承载力经验公式计算， V_r 和 V_s 按式(30)、(31)计算。

$$V_r=nA_sf_{vy}\quad(31)$$

$$V_s=\frac{4\times0.58\alpha_ft_1h_sf_{vy}}{\lambda}\quad(32)$$

式中： n 为板面穿柱钢筋数量； A_s 为钢筋横截面面积； f_{vy} 钢筋屈服强度； α_f 为型钢剪力架抗弯刚度影响系数； t_1 和 h_s 分别为型钢剪力架腹板的板厚和高度； λ 为剪跨比。

3.4 基于机器学习的板柱节点冲切性能预测模型

Bu 等^[80]建立了冲切试验数据库，基于莱文贝格-马夸特(LM)算法，结合反向传播误差神经网络(BPNN)的非线性函数，建立了无抗冲切箍筋板柱节点抗冲切承载力预测模型。该模型以混凝土强度、纵向钢筋配筋率、纵向钢筋屈服强度、板的有效高度、剪跨比、柱边长与板有效高度之比为学习参数，通过均方误差分析和回归分析进行评估预测。与各国规范计算值相比，该 BPNN 预测模型精确度高、离散度小，平均相对误差不超过 10%。

李昕等^[81]基于多元线性回归(MLR)和神经网络(ANN)两种计算机学习模型进行多个因素下的钢筋混凝土板柱节点抗冲切承载力预测(图 11)，并采用判定系数 R^2 评价模型性能。由图 11 可知，与 MLR 模型相比，ANN 预测模型精度更高。

Setiawan 等^[82]提出了一种基于临界剪切裂缝理论(CSCT)的非线性节点单元预测模型，该模型能够简单地计算弯曲、扭转和偏心力对板柱之间力矩传递的相对贡献，不仅适用于无抗剪钢筋板柱节点的抗冲切承载力预测，也可扩展到配置抗剪钢筋的板柱节点冲切承载力的预测。文献[83]采用 ATENA 非线性有限元分析和临界剪切裂缝理论(CSCT)研究了地震荷载下无抗冲切钢筋板柱节点

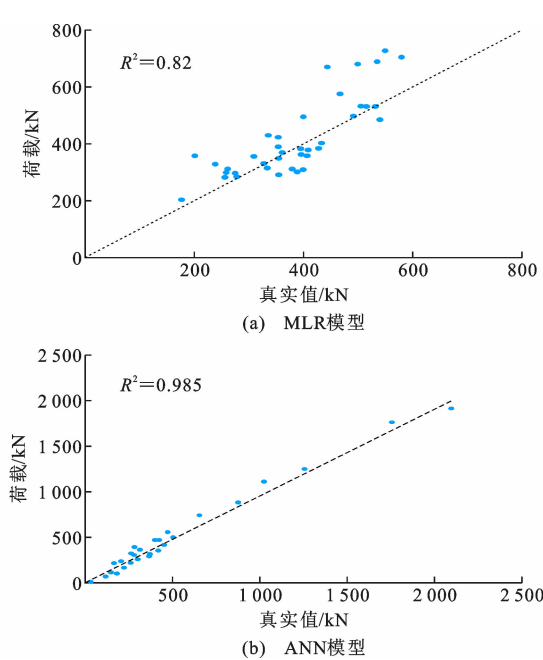


图 11 预测模型承载力散点图
Fig. 11 Scatter diagram of predictive model bearing capacity

的冲切性能，并基于冲切试验数据库对比了两种分析方法，结果表明：基于临界剪切裂缝理论建立的预测模型离散度较小，预测结果更为精确，可为板柱节点的设计提供理论依据。

Choi 等^[84]认为当重力荷载作用于板上时，当前设计规范中规定的柱有效抗压强度可能是不安全的，并提出了一种用于重力荷载下与 NSC 板相交的 HSC 内柱有效抗压强度预测模型。由于不平衡力矩对角柱或边缘柱有效抗压强度的影响不同于内柱，故该模型仅适用于板柱连接中内柱有效抗压强度的预测，因此需进一步开展研究。

Faridmehr 等^[85]将人工神经网络与元启发式 Bat 算法相结合，开发了一种考虑板的有效深度、混凝土强度、配筋率、钢筋屈服强度和柱宽的新型 ANN-Bat 混合计算模型，用于预测钢筋混凝土平板的抗冲切承载力。通过比较发现，抗冲切承载力试验值与预测值之比的最大值和平均值分别为 0.99 和 1.01，这说明 ANN-Bat 模型具有较高的精度。

3.5 小 结

综上，通过有限元数值模拟或试验分析所得板柱节点抗冲切承载力预测模型均有较好的精度，但适用范围存在一定局限性。造成预测模型应用受限的原因有：①板柱节点冲切承载力的影响参数通常为混凝土强度、板有效高度、板的配筋率、钢筋的屈服强度、柱尺寸等，而各学者所考虑的参数不同，故

所得到的承载力计算公式适用条件也不同;②大部分学者所推导出的预测模型仅建立在所做试验基础上,未通过大量的数据分析和对比试验证明预测模型的普遍适用性。

板柱节点抗冲切承载力主要预测方法包括对现有规范进行改进和数值模拟分析。然而这两种方法预测板柱节点抗冲切承载力相对误差在 5%~50%不等,存在一定的波动性。基于机器学习建立的预测模型在预测抗冲切承载力时考虑的参数更多,可基于大量数据分析将相对误差控制在 10%以下,具有较高的精度,适合推广应用。

4 结 语

(1)本文介绍了几种抗冲切元件,包括箍筋和弯起钢筋、抗剪锚栓、型钢剪力架、托板和柱帽。各类抗冲切元件均可不同程度提高板柱节点抗冲切承载力,而抗剪钢筋在混凝土薄板中应用受限,故往往采用抗剪锚栓、型钢剪力架来加强板柱节点的抗冲切性能。其中,采用放射状布置抗剪锚栓或倒 T 形型钢剪力架能够显著提高板柱节点的抗冲切承载力,采用腹板开洞型钢剪力架能够有效改善板柱节点的延性,而采用肢间加强型钢剪力架具有刚度较大的缺点,对板柱节点的延性有不利影响。因此,建议利用抗剪锚栓的灵活布置和型钢剪力架承载力大的特点,将腹板开洞的型钢剪力架与抗剪锚栓组合应用在板柱节点中。此外,配置型钢剪力架板柱节点的冲切性能研究普遍停留在有限元数值分析层面,建议未来通过试验研究和基于大数据技术完善该领域的研究。托板通常与柱帽共同抵抗冲切力,且以斜柱帽和上反倾斜柱帽的布置形式对板柱节点承载力和延性的提高最显著。

(2)归纳总结了基于规范改进承载力计算公式、有限元数值模拟和机器学习 3 种分析板柱节点冲切承载力的方法。其中,规范承载力改进公式只对特定的试验预测精度较高,但其对现有规范后续修订工作具有一定的参考意义。基于机器学习所提出的预测模型考虑因素较全面,预测误差小,具有普遍推广性。同时,基于机器学习研究土木工程结构性能问题逐渐成为主流趋势,可进一步通过机器学习完善板柱节点承载力预测模型的精确性和适用条件。

(3)作用在开洞板柱试件上的偏心荷载对板柱试件冲切承载力有较大的影响,当偏心荷载作用在开洞一侧时,对板件的抗冲切强度降低较明显。目前对无开洞板柱节点冲切承载力的研究较为全面,

而对开洞板柱试件冲切承载力的预测缺乏足够的理论和试验研究,今后可针对其抗冲切承载力计算方法等方面开展相关研究。

(4)目前关于受损板柱试件的修复与加固的研究仍然较少,故受损板柱节点的修复和加固可成为今后研究和关注的重点。

参考文献:

References:

- [1] 何健安. 韩国三丰百货大楼坍塌后的深思[J]. 施工技术, 1995, 24(10): 38-40.
HE Jianan. Thinking after the collapse of Sanfeng department store in South Korea[J]. Construction Technology, 1995, 24(10): 38-40.
- [2] MIRZAEI Y, MUTTONI A. Tests of the post-punching behavior of the reinforced concrete flat slabs [R]. Lausanne: Université de Lausanne, 2008.
- [3] 陆新征, 廖文杰, 林楷奇, 等. 我国工程结构防连续倒塌研究: 回顾与展望[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 102-112, 135.
LU Xinzhen, LIAO Wenjie, LIN Kaiqi, et al. Research progress of the progressive collapse prevention of engineering structures in China: a review and prospect[J]. Building Structure, 2019, 49(19): 102-112, 135.
- [4] 王浩然, 李 爽, 翟长海. 填充墙对结构连续倒塌影响的研究进展[J]. 工程力学, 2022, 39(10): 1-16.
WANG Haoran, LI Shuang, ZHAI Changhai. Research progress on influence of infill wall on progressive collapse of structure[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(10): 1-16.
- [5] JANG J I, KANG S M. Punching shear behavior of shear reinforced slab-column connection with varying flexural reinforcement [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2019, 13(1): 1-14.
- [6] KANG S M, NA S J, HWANG H J. Punching shear strength of reinforced concrete transfer slab-column connections with shear reinforcement[J]. Engineering Structures, 2021, 243: 112610.
- [7] 刘文琰, 黄承逵. 钢筋混凝土板配置抗冲切锚栓的设计建议[J]. 建筑结构, 2006, 36(1): 67-71.
LIU Wenting, HUANG Chengkui. Design of stud-shear reinforcement for RC slabs[J]. Building Structure, 2006, 36(1): 67-71.
- [8] 金 玉, 易伟建, 胡 岚, 等. 配置抗冲切键的钢筋混凝土板柱节点性能试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(4): 60-64, 110.
JIN Yu, YI Weijian, HU Lan, et al. Experimental

- study of performance of reinforced concrete slab-column connection with punching shear keys[J]. Industrial Construction, 2017, 47(4): 60-64, 110.
- [9] ISLAM S, PARK R. Tests on slab-column connections with shear and unbalanced flexure[J]. Journal of the Structural Division, 1976, 102(3): 549-568.
- [10] 舒兆发, 李定国. 配置抗冲切钢筋的混凝土板柱连接的强度和性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 1987, 14(1): 39-52.
- SHU Zhaofa, LI Dingguo. Experimental investigation on strength and performance of concrete slab-column connections with shear reinforcement[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 1987, 14(1): 39-52.
- [11] 刘广义, 栾英, 刘晓东. 配抗冲切弯筋板冲切问题试验研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1994(3): 47-52.
- LIU Guangyi, LUAN Ying, LIU Xiaodong. An experimental study on R.C. Slabs with punching bent up reinforcement subjected to punching[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1994(3): 47-52.
- [12] 代伟明, 张扬, 钱稼茹, 等. 高重剪比下配置栓钉的板柱节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7): 126-132.
- DAI Weiming, ZHANG Yang, QIAN Jiaru, et al. Experimental study on seismic performance of slab-column connection with shear studs under large gravity-shear ratio[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 126-132.
- [13] DAM T X, WIGHT J K. Flexurally-triggered punching shear failure of reinforced concrete slab-column connections reinforced with headed shear studs arranged in orthogonal and radial layouts[J]. Engineering Structures, 2016, 110: 258-268.
- [14] JIAO Z Y, LI Y, GUAN H, et al. Pre- and post-punching failure performances of flat slab-column joints with drop panels and shear studs[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 140: 106604.
- [15] 张扬, 代伟明, 钱稼茹, 等. 板柱节点拟静力试验及板栓钉群外受冲切承载力计算方法[J]. 建筑结构, 2013, 43(12): 39-42.
- ZHANG Yang, DAI Weiming, QIAN Jiaru, et al. Quasi-static test of slab-column connections and calculating method of punching shear strength outside stud group[J]. Building Structure, 2013, 43(12): 39-42.
- [16] 金玉, 易伟建, 胡岚, 等. 配栓钉的钢筋混凝土双向板受力性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(3): 77-84.
- JIN Yu, YI Weijian, 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.
- [17] 车文鹏, 陈建伟, 田稳苓, 等. 带抗剪锚栓板柱节点抗冲切性能分析与优化设计[J]. 建筑结构, 2021, 51(9): 84-91.
- CHE Wenpeng, CHEN Jianwei, TIAN Wenling, et al. Analysis and optimization design of punching shear performance of slab-column connections with shear studs[J]. Building Structure, 2021, 51(9): 84-91.
- [18] 王瑞. 配置不同形式抗冲切钢筋对板柱结构节点冲切性能影响[D]. 唐山: 华北理工大学, 2019.
- WANG Rui. Study on the anti-punching and cutting performance of different kinds of anti-punching bar column joints[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2019.
- [19] 党隆基, 庞瑞, 梁书亭, 等. 竖向荷载下空心楼盖板柱节点试验研究与计算分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(3): 478-483.
- DANG Longji, PANG Rui, LIANG Shuting, et al. Experimental study and calculation analysis on hollow floor slab-column connection under vertical load[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2018, 48(3): 478-483.
- [20] 吴艺, 吕西林, 扶长生. 型钢剪力架板柱节点抗震性能研究[J]. 结构工程师, 2016, 32(3): 70-76.
- WU Yi, LU Xilin, FU Changsheng. Study of seismic performances of RC slab-column joints with shear-head reinforcement[J]. Structural Engineers, 2016, 32(3): 70-76.
- [21] BOMPA D V, ELGHAZOUALI A Y. Nonlinear numerical simulation of punching shear behavior of reinforced concrete flat slabs with shear-heads[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2020, 14(2): 331-356.
- [22] 王建平, 丁慧, 宋力. 抗冲切元件对板柱节点受力性能的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(3): 205-208.
- WANG Jianping, DING Hui, SONG Li. The effect of anti-punching elements on the mechanical behavior of slab-column connections nodes[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(3): 205-208.
- [23] 樊周正, 郭惠勇. 内置型钢剪力架板柱节点抗冲切性能研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2016,

- 33(4):1-7.
- FAN Zhouzheng, GUO Huiyong. Research on punching shear behavior of CFT column to flat slab connections[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2016, 33(4):1-7.
- [24] AL-ABASEI J S, ABBAS A, QASSEM H. Experimental study of flat plate construction with special embedded shearhead[J]. Journal of Engineering and Sustainable Development, 2007, 11(3):95-107.
- [25] 杜旭. 板柱节点配置型钢剪力架对受弯和直剪承载力的影响分析及设计改进[J]. 结构工程师, 2022, 38(5):29-35.
- DU Xu. Analysis of influence of shear head on flexural and direct shear resistances in RC slab-column structures and design modification[J]. Structural Engineers, 2022, 38(5):29-35.
- [26] 倪阳, 江毅, 易伟文, 等. 一种加栓钉的型钢剪力架加强的无梁楼盖板柱节点: CN217204821U[P]. 2022-08-16.
- NI Yang, JIANG Yi, YI Weiwen, et al. A beamless floor cover slab-column node strengthened by a steel shear frame with pegs; CN217204821U[P]. 2022-08-16.
- [27] 林若凯, 江毅, 李妍, 等. 型钢剪力架增强混凝土板柱节点抗冲切试验研究[J/OL]. 工程力学: 1-14 [2023-12-04] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20221121.0855.002.html>.
- LIN Ruokai, JIANG Yi, LI Yan, et al. Experimental study on punching-shear resistance of reinforced concrete slab-column joints reinforced with SSF[J/OL]. Engineering Mechanics: 1-14 [2023-12-04] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20221121.0855.002.html>.
- [28] AL-HAMD R K S, GILLIE M, CUNNINGHAM L S, et al. Novel shearhead reinforcement for slab-column connections subject to eccentric load and fire[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019, 19(2):503-524.
- [29] MOE J. Shearing strength of reinforced concrete slabs and footings under concentrated loads[M]. Skokie: Portland Cement Association, 1961.
- [30] HAWKINS N, CORLEY W. Moment transfer to columns in slabs with shearhead reinforcement[J]. Special Publication, 1974, 42:847-880.
- [31] TARESH H R, YATIM M Y M, AZMI M R. Punching shear behaviour of interior slab-column connections strengthened by steel angle plates[J]. Engineering Structures, 2021, 238:112246.
- [32] 童亿力, 孙俊豪, 邬林锋, 等. 不同柱帽布置形式的板柱节点抗冲切性能有限元分析[J]. 水利规划与设计, 2022(9):122-126.
- TONG Yili, SUN Junhao, WU Linfeng, et al. Finite element analysis of punching shear resistance of slab column joints with different column cap arrangements[J]. Water Resources Planning and Design, 2022(9):122-126.
- [33] JASIM A H, AMMASH H K. Effect of using column capital on the punching shear strength of flat slab-edge column connection under eccentric loading[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1895(1):012060.
- [34] 王焱, 章鹏成, 李明辉, 等. 柱帽结构形式对无梁楼盖受力性能的影响[J]. 建筑科技, 2019, 3(3):84-88.
- WANG Yan, ZHANG Pengcheng, LI Minghui, et al. Influence of column cap structure on mechanical performance of beamless floor[J]. Building Technology, 2019, 3(3):84-88.
- [35] 王璐, 薛彦涛, 王翠坤. 带钢柱帽的板柱-支撑结构抗震性能试验研究[J/OL]. 建筑结构学报: 1-17 [2023-12-04] <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0786>.
- WANG Lu, XUE Yantao, WANG Cuikun. Experimental research on seismic performance of slab column-buckling restrained brace system with steel capitals[J/OL]. Journal of Building Structures: 1-17 [2023-12-04] <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2020.0786>.
- [36] WANG L, XUE Y T, WANG C K, et al. Seismic performance of flat plate structure with steel capital[J]. ACI Structural Journal, 2019, 116(2):221-232.
- [37] 李伊晨, 李易, 周大兴, 等. 设置托板和暗梁的板柱节点冲剪后受力性能的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(5):178-186.
- LI Yichen, LI Yi, ZHOU Daxing, et al. Experimental study on post-punching mechanical performance of flat slab-column joints with drop panel and embedded beam[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2020, 40(5):178-186.
- [38] SILVA M A L, DEDIGAMUWA K V, GAMAGE J C P H. Performance of severely damaged reinforced concrete flat slab-column connections strengthened with carbon fiber reinforced polymer[J]. Composite Structures, 2021, 255:112963.
- [39] GHERDAOUI M, GUENFOUD M, MADI R. Punching behavior of strengthened and repaired RC slabs

- with CFRP[J]. Construction and Building Materials, 2018,170:272-278.
- [40] EL-SAYED K, KHALIL N, OMAR M. Repair and strengthening of R.C flat slab connection with edge columns against punching shear[J]. Advances in Research, 2016,8(3):1-22.
- [41] ASKAR H S. Usage of prestressed vertical bolts for retrofitting flat slabs damaged due to punching shear [J]. Alexandria Engineering Journal, 2015, 54 (3): 509-518.
- [42] AMMASH H K, KADHIM S S, DHAHIR M K. Repairing half-loaded flat slabs against punching shear using steel stiffeners[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022,16:e01032.
- [43] LIBERATI E A P, MARQUES M G, LEONEL E D, et al. Failure analysis of punching in reinforced concrete flat slabs with openings adjacent to the column [J]. Engineering Structures, 2019,182:331-343.
- [44] AKKAYA S T, MERCIMEK O, GHOROUBI R, et al. Experimental, analytical, and numerical investigation of punching behaviour of two-way RC slab with multiple openings[J]. Structures, 2022, 43: 574-593.
- [45] MERCIMEK O, GHOROUBI R, OZDEMIR A, et al. Punching behaviour of two-way RC slabs having different multiple opening locations and sizes strengthened with TRM[J]. Structures, 2022,42:531-549.
- [46] EL-SHAFIEY T F, ATTA A M, HASSAN A, et al. Effect of opening shape, size and location on the punching shear behaviour of RC flat slabs[J]. Structures, 2022,44:1138-1151.
- [47] HA T, LEE M H, PARK J, et al. Effects of openings on the punching shear strength of RC flat-plate slabs without shear reinforcement[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2015, 24 (15): 895-911.
- [48] AUGUSTIN T, FILLO L, HALVONIK J. Punching resistance of slab-column connections with openings [J]. Structural Concrete, 2020, 21(1): 278-290.
- [49] BURSAC S, BESEVIC M, VOJNIC PURCAR M, et al. Experimental analysis of punching shear strength of eccentrically loaded slab with the opening along the face of the internal column[J]. Engineering Structures, 2021, 249: 113359.
- [50] BALOMENOS G P, GENIKOMSOU A S, POLAK M A. Investigation of the effect of openings of interior reinforced concrete flat slabs[J]. Structural Concrete, 2018,19(6):1672-1681.
- [51] ANL O, ULUSOY B. Nonlinear FEA of two-way RC slabs' punching behavior with openings [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2020, 44(4): 1109-1124.
- [52] MOSTOFINEJAD D, JAFARIAN N, NADERI A, et al. Effects of openings on the punching shear strength of reinforced concrete slabs[J]. Structures, 2020, 25: 760-773.
- [53] ZIVKOVIC S, BESEVIC M, PURCAR M V, et al. Nonlinear finite element analysis of punching shear strength of eccentrically loaded RC flat slabs with opening[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(11): 4771-4780.
- [54] AL-ROUSAN R Z, ALNEMRAWI B R. Punching shear code provisions examination against the creation of an opening in existed RC flat slab of various sizes and locations[J]. Structures, 2023, 49: 875-888.
- [55] GENIKOMSOU A S, POLAK M A. Effect of openings on punching shear strength of reinforced concrete slabs-finite element investigation[J]. ACI Structural Journal, 2017, 114(5): 1249.
- [56] ALROUSAN R Z, ALNEMRAWI B R. The influence of concrete compressive strength on the punching shear capacity of reinforced concrete flat slabs under different opening configurations and loading conditions[J]. Structures, 2022, 44: 101-119.
- [57] MILLIGAN G J, POLAK M A. Influence of openings on the punching shear behaviour of concrete slabs supported on special-shaped columns[J]. Engineering Structures, 2023, 284: 115968.
- [58] YOUSEF A M, EL-METWALLY S E, ASKAR H H, et al. Behavior of high-strength concrete interior slab-column connections with openings under seismic loading [J]. Construction and Building Materials, 2019, 214: 619-630.
- [59] EL-MANDOUH M A, ABU EL-HASSAN K. Cyclic behavior of high strength lightweight concrete slab-edge column connections with and without openings [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e00832.
- [60] EL-MANDOUH M A, HU J W, ABD EL-MAULA A S. Seismic behavior of RC slab-column connection with openings strengthened with CFRP [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01517.
- [61] OUKAILI N K, MERIE H D. CFRP strengthening efficiency on enhancement punching shear resistance of RC bubbled slabs with openings[J]. Case Studies in Construction Materials, 2021, 15: e00641.

- [62] 樊健生,王哲,杨松,等.超高性能混凝土板冲切与弯曲性能研究[J].工程力学,2021,38(4):30-43.
FAN Jiansheng, WANG Zhe, YANG Song, et al. Research on punching shear and bending behavior of ultra-high performance concrete slabs[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(4): 30-43.
- [63] 王安宝,杨秀敏,史维汾.钢筋砼无梁板结构的极限承载力计算及破坏类型判别方法[C]//中国力学学会.第十届全国结构工程学术会议论文集第Ⅱ卷.北京:《工程力学》杂志社,2001:9-18.
WANG Anbao, YANG Xiumin, SHI Weifen. Calculation of ultimate bearing capacity of reinforced concrete beamless slab structure and method of damage type discrimination[C]//Chinese Society of Mechanics. Proceedings of the Tenth National Conference on Structural Engineering, Volume II. Beijing: *Engineering Mechanics Press*, 2001: 9-18.
- [64] 曹明,龚绍熙.钢筋混凝土板柱节点弯冲界限破坏的分析[J].福州大学学报(自然科学版),1996,24(增1):186-192.
CAO Ming, GONG Shaoxi. Analysis of bending and punching limit failure of reinforced concrete slab-column joints[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Sciences Edition), 1996, 24(S1): 186-192.
- [65] 吴强,程文灏,杜新年.混凝土板柱结构中柱节点承载力及破坏形态的研究[J].工业建筑,2004,34(4):43-45.
WU Qiang, CHENG Wenrang, DU Xinnian. The bearing capacity and failure modes study of interior connections in RC slab-column structures[J]. Industrial Construction, 2004, 34(4): 43-45.
- [66] XIAO R Y, CHIN C S. Flat slabs at slab-column connection: nonlinear finite element modelling and punching shear capacity design criterion[J]. Advances in Structural Engineering, 2007, 10(5): 567-579.
- [67] 蔡怡晴,费正玉,梁诗雪.钢筋混凝土板柱节点破坏模式判别公式的评估[J].科技通报,2022,38(10):85-90,95.
CAI Yiqing, FEI Zhengyu, LIANG Shixue. Evaluation of failure mode discrimination formula for existing reinforced concrete slab column joints[J]. Bulletin of Science and Technology, 2022, 38(10): 85-90, 95.
- [68] 卢昱成,李庆华,童精中,等.UHTCC-混凝土组合板柱节点抗冲切承载力分析[J].低温建筑技术,2022,44(7):117-120.
LU Yucheng, LI Qinghua, TONG Jingzhong, et al. Punching resistance of UHTCC-concrete composite slab-column connections[J]. Low Temperature Archi-
tecture Technology, 2022, 44(7): 117-120.
- [69] MUTTONI A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(4): 440-450.
- [70] 夏成亮,史庆轩,王震.无抗冲切钢筋的RC板柱节点受冲切承载力计算[J].哈尔滨工业大学学报,2022,54(4):18-24.
XIA Chengliang, SHI Qingxuan, WANG Zhen. Calculation of punching shear capacity of RC slab-column connections without shear reinforcement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(4): 18-24.
- [71] 赵晋,易伟建.无腹筋板柱节点抗冲切承载力计算研究[J].建筑结构,2019,49(13):120-123,131.
ZHAO Jin, YI Weijian. Calculation and study on punching bearing capacity of slab-column joints without shear reinforcement[J]. Building Structure, 2019, 49(13): 120-123, 131.
- [72] RANKIN G I B, LONG A E. Punching strength of conventional slab-column specimens[J]. Engineering Structures, 2019, 178: 37-54.
- [73] 党隆基,庞瑞,梁书亭,等.板柱节点极限承载力计算及国内外规范比较[J].建筑科学,2019,35(1):32-37,134.
DANG Longji, PANG Rui, LIANG Shuting, et al. Ultimate bearing capacity calculation of slab-column connections and comparative study on different codes at home and abroad[J]. Building Science, 2019, 35(1): 32-37, 134.
- [74] 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.
DENG Qing. Study on punching shear behavior and capacity of reinforced concrete slab-column connections[D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [75] 孙俊豪,费正玉,梁诗雪.基于抛物线形库仑-莫尔准则的板柱节点冲切承载力计算模型[J].水利规划与设计,2022(8):97-101.
SUN Junhao, FEI Zhengyu, LIANG Shixue. Punching shear strength of concrete slab-column connections based on parabolic Coulomb-Mohr strength criterion[J]. Water Resources Planning and Design, 2022(8): 97-101.
- [76] 装配式混凝土结构技术规程:JGJ 1—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
Technical specifications for precast concrete structures: JGJ 1—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [77] 周理,黄勇,陈波,等.型钢混凝土板柱节点抗

冲切性能试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2022,30(3):618-632.

ZHOU Li, HUANG Yong, CHEN Bo, et al. Experimental study on punching shear behavior of steel reinforced concrete slab-column joints[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2022,30(3):618-632.

[78] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

Code for design of concrete structures:GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011.

[79] Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary:ACI 318-08[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute,2014.

[80] BU J E, ZHANG F Z, ZHU M, et al. Prediction of punching capacity of slab-column connections without transverse reinforcement based on a backpropagation neural network[J]. Advances in Civil Engineering, 2019,2019:1-19.

[81] 李 昕,陈洪根,左 乐,等. 钢筋混凝土板柱节点抗冲切承载力预测与影响因素分析[J]. 建筑结构, 2021,51(增 2):963-967.

LI Xin, CHEN Honggen, ZUO Le, et al. Prediction of punching shear bearing capacity of reinforced concrete slab-column joints and analysis of influencing factors [J]. Building Structure, 2021,51(S2):963-967.

[82] SETIAWAN A, VOLLUM R L, MACORINI L, et al. Efficient 3-D modelling of punching shear failure at slab-column connections by means of nonlinear joint elements [J]. Engineering Structures, 2019, 197: 109372.

[83] SETIAWAN A, VOLLUM R L, MACORINI L. Numerical and analytical investigation of internal slab-column connections subject to cyclic loading[J]. Engineering Structures, 2019,184:535-554.

[84] CHOI S H, HEO I, KIM J H, et al. Effect of slab gravity load on slab-column connection with different compressive strengths[J]. Journal of Building Engineering, 2022,45:103647.

[85] FARIDMEHR I, NEHDI M L, HAJMOHAMMADI-AN BAGHBAN M. Novel informational bat-ANN model for predicting punching shear of RC flat slabs without shear reinforcement[J]. Engineering Structures, 2022,256:114030.