

无梁楼盖板柱节点冲切破坏与抗倒塌研究综述

查云丽

西南林业大学土木工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年6月23日; 录用日期: 2026年7月15日; 发布日期: 2026年7月27日

摘 要

无梁楼盖具有净空高、施工方便、空间布置灵活等优点, 但板柱节点区域同时承受较大的剪力、弯矩和局部应力集中, 易发生脆性的冲切破坏, 并可能诱发楼盖连续倒塌。基于板柱节点、无梁楼盖、地下车库事故、高性能材料、抗冲切构造、抗震与连续倒塌等文献, 本文按照“研究问题-理论演进-工程反馈”的线索, 对冲切机理与承载力模型、规范比较、影响参数、增强措施、多灾害作用、连续倒塌及数值模拟和数据驱动方法进行综述。总体来看, 现有研究已从单节点静力承载力扩展到复杂边界、局部超载、体系倒塌和数据驱动预测; 但在真实边界条件、模型统一性、后冲切性能和跨尺度验证方面仍需进一步深化。

关键词

无梁楼盖, 板柱节点, 冲切破坏, 抗冲切承载力, 连续倒塌

Research Review of Punching Shear Failure and Collapse Resistance of Slab-Column Connections in Flat Slab Systems

Yunli Zha

College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan

Received: June 23, 2026; accepted: July 15, 2026; published: July 27, 2026

Abstract

Flat slab systems offer advantages such as greater clear height, simplified construction, and flexible spatial arrangement. However, the slab-column connection region is subjected simultaneously to considerable shear forces, bending moments, and local stress concentration, making it susceptible to brittle punching shear failure and potentially triggering progressive collapse of the floor system.

文章引用: 查云丽. 无梁楼盖板柱节点冲切破坏与抗倒塌研究综述[J]. 土木工程, 2026, 15(7): 103-111.
DOI: 10.12677/hjce.2026.157183

Based on the literature concerning slab-column connections, flat slabs, underground garage collapse accidents, high-performance materials, punching shear reinforcement, seismic performance, and progressive collapse, this paper reviews the punching shear mechanism and bearing capacity models, code comparisons, influencing parameters, strengthening measures, multi-hazard effects, progressive collapse, as well as numerical simulation and data-driven methods following the logic of “research issues - theoretical evolution - engineering feedback”. Overall, existing studies have extended from the static bearing capacity of isolated connections to complex boundary conditions, local overloading, structural-system collapse, and data-driven prediction. Nevertheless, further investigation is still required regarding realistic boundary conditions, model unification, post-punching performance, and cross-scale validation.

Keywords

Flat Slab, Slab-Column Connection, Punching Shear Failure, Punching Shear Capacity, Progressive Collapse

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

板柱结构由于取消梁后形成平整板底，能够提高净空、简化模板并改善建筑空间利用率。国内关于无梁楼盖地下车库的工程总结指出，该体系在地下车库顶板中应用广泛，但事故多表现为竖向荷载作用下板柱节点冲切或弯剪破坏后引发局部乃至连续倒塌[1][2]。国外研究同样强调，平板结构中柱周区域承受高剪力和不平衡弯矩，极限状态通常由局部冲切控制，而该局部失效会改变周边节点受力并引发更大范围损伤[3]-[6]。因此，板柱节点研究不能仅停留在单个节点承载力层面，还需关注结构体系、施工阶段超载和灾害工况下的鲁棒性。

从研究发展看，早期研究多以标准内柱节点和单调竖向荷载试验为基础，关注冲切承载力公式的建立与修正；随后，随着地下车库事故、异形边界节点和高性能材料应用增多，研究对象逐渐转向“真实荷载-复杂边界-体系鲁棒性”的综合问题。国内文献较多围绕规范适用、工程事故和构造措施展开，强调板厚、柱帽托板、最小抗冲切配筋和施工荷载控制等工程问题[1][2][7]-[9]；国际研究则更关注临界剪切裂缝理论、复杂边界节点和新型材料增强方法[3][4][10][11]。两类研究虽切入点不同，但共同说明板柱节点冲切破坏并非单一受剪问题，而是几何尺寸、配筋、材料性能、边界条件和荷载路径共同作用的结果。

2. 冲切破坏机理与承载力模型

冲切机理研究的核心问题是：板柱节点的极限承载力究竟由名义剪应力、裂缝宽度、板转角还是多种传力机制共同控制。早期认识通常将冲切破坏描述为弯曲裂缝发展、斜裂缝扩展和柱周冲切锥形成的过程，国内综述也多从混凝土压区、骨料咬合作用、钢筋销栓作用和临界裂缝形态等角度解释破坏机理[12]-[14]。随着试验数据库扩大，研究者逐渐发现不同模型在影响因素选取和权重分配上差异明显，王朋等对七类代表性模型和 202 个试验数据进行统计后指出，我国规范对纵筋配筋率等参数的考虑仍不充分[14]。

围绕“裂缝是否是承载力退化的控制变量”，国外形成了以临界剪切裂缝理论(CSCT)为代表的变形

控制思路。该理论通过板转角、裂缝宽度与抗剪能力之间的关系解释冲切破坏，并已用于矩形板、内凹角柱和不对称节点分析[3][4][11]。与此不同，基于修正压力场理论(MCFT)的研究更强调混凝土剪压区、斜拉区骨料咬合和受拉钢筋销栓作用的分解贡献。夏成亮等据此提出无抗冲切钢筋节点承载力计算方法，并对 54 个试件取得较好预测效果[15]；针对配置抗冲切钢筋的节点，相关研究进一步将箍筋、栓钉等增强构件纳入临界斜裂缝与剪力传递机制中[16]。

近年来，模型发展开始从“单一极限荷载公式”转向“全过程荷载-变形响应”。例如，PSRT 试图以双自由度运动学理论描述钢筋混凝土板和基础冲切前后的变形响应[10]；Zheng 等针对正交方向等抗弯承载力的矩形平板发现，即使抗弯承载力在两个方向相等，板长宽比仍会显著影响荷载-转角曲线、裂缝形态和双向剪力分配，并据此提出修正 CSCT 模型[11]。这些研究表明，冲切破坏并非简单轴对称问题，板格尺寸、柱截面形状、双向配筋差异和边界约束均会改变控制截面上的剪应力分布。为进一步呈现不同理论模型和规范方法之间的差异，本文从理论假设、计算复杂度、预测精度以及适用范围与局限性四个方面进行对比，具体见表 1。

Table 1. Comparison of major punching shear capacity models and standardization methods

表 1. 主要冲切承载力模型及规范方法比较

模型/方法	理论假设	计算复杂度	预测精度	适用范围及局限
CSCT	以临界裂缝宽度、板转角和变形能力控制冲切承载力，强调裂缝开展对抗剪能力的削弱。	中等；需确定板转角、弯矩-转角关系和临界控制截面。	对常规内柱和部分复杂边界具有较好解释力，但受边界条件与转角计算影响明显。	适用于变形控制明显的板柱节点；对强不对称边界、开洞、后冲切阶段和抗剪构造锚固失效仍需修正。
MCFT	将剪力传递分解为混凝土剪压区、骨料咬合、钢筋销栓及抗冲切钢筋贡献。	较高；需识别裂缝角度、应变状态和多种传力分量。	对机理解释较充分，适合参数分析；但预测依赖材料本构和分项贡献假定。	适用于解释无抗冲切钢筋和配置抗冲切钢筋节点；工程公式化难度较大，对复杂加载路径仍需校核。
规范模型 (GB、ACI、EC2 等)	多以名义剪应力、控制周长、有效高度和经验系数表征承载力。	低；便于工程设计和审查。	对常规设计具有可操作性，但不同规范对预应力、配筋率、尺寸效应和上限项处理差异较大。	适用于常规工程快速验算；对局部超载、异形柱、复杂边界、火灾后性能和连续倒塌场景解释不足。

由表 1 可见，不同冲切承载力模型并非简单的计算公式差异，而是反映了对冲切破坏控制机制的不同理解。CSCT 突出裂缝宽度和板转角对承载力退化的控制作用，MCFT 强调多种剪力传递机制的分解贡献，而规范模型则更注重工程设计中的简化与可操作性。总体来看，理论模型有助于揭示破坏机理，规范方法便于工程应用，但面对复杂边界、局部超载、抗冲切构造锚固失效及后冲切阶段响应时，仍需要结合试验、数值模拟和工程经验进行修正与验证。

3. 规范比较、事故反演与工程设计启示

规范比较关注的是：复杂力学模型如何转化为可执行的设计准则。王立军对 GB 50010 与 ACI 318-19 进行对比，认为无抗冲切钢筋板的 ACI 抗冲切承载力略高于中国规范，而有抗冲切钢筋时 ACI 对混凝土项的取值略低；同时指出，即使计算上混凝土抗冲切承载力满足要求，工程设计中仍宜设置最小抗冲切配筋，并通过“强冲切、弱弯曲”的思路避免脆性破坏[1]。国际研究也持续评价不同规范的预测能力，Qu 等比较 GB、ACI、CSA、Eurocode 2 和 JSCE 对无粘结预应力节点的预测差异，指出各规范对预应力

贡献和承载力上限项的处理差异会导致保守性或不安全偏差[17]。

与规范比较相对应,事故反演揭示的是“规范验算合格”与“真实工程安全”之间仍可能存在间隙。国内地下车库事故分析常将覆土堆载、施工车辆、托板施工缝和局部超载视为关键诱因[1][2][7]; Zhong 和 Lin 关于局部超载的分析表明,当地下车库中节点在局部堆载下发生破坏时,周边更大范围的连续破坏几乎不可避免,设柱帽和托板结构具有相对更高安全裕度[7]。Yang 等通过超载平板子结构试验和真实堆载倒塌模拟进一步指出,板柱节点失效诱发倒塌与传统“拆柱法”倒塌机制存在显著差别,并观察到反向荷载重分布现象[5][6]。

由此可见,规范设计的学术争议已不再局限于“某一公式偏保守还是偏危险”,而是转向规范模型能否覆盖施工阶段、运营阶段和灾害工况下的非标准失效场景。当前较为一致的认识是,板柱结构抗倒塌设计不能仅依赖柱失效替代路径假定,施工阶段局部堆载、覆土变化、材料实际强度不足和节点冲切失效均应成为独立设计或复核场景。相关研究表明,规范比较揭示了不同模型在安全储备和参数处理上的差别,事故反演则说明施工及运营阶段局部荷载是板柱结构风险的重要来源。

4. 影响参数:几何、配筋、材料与边界条件

影响参数研究最初主要回答“哪些设计变量能提高抗冲切承载力”。板厚、混凝土强度、纵筋配筋率和冲跨比是最常被讨论的基本参数。邸振勇等试验表明,增加板厚、配筋率、混凝土强度并降低冲跨比均可提高节点抗冲切承载力,其中配筋率由 0.6%提高至 1.4%时承载力最高增幅可达 29.2% [18]。Alateyat 等针对 GFRP 筋混凝土平板建立有限元模型,指出板厚、混凝土强度、配筋率和柱尺寸同样是影响 GFRP 筋平板冲切能力的关键设计参数[19]。这说明无论采用钢筋还是 GFRP 筋,有效高度和受拉配筋都会通过裂缝宽度、板转角及销栓作用共同影响冲切承载力。

随着研究深入,学者开始关注参数之间的耦合作用,而不是单个参数的线性贡献。纵筋影响尤其具有代表性:王旭松基于 CSCT 和 DIANA 非线性有限元分析发现,边柱节点中 Y 向上部纵筋增大可能显著增加不平衡负弯矩,难以提高混凝土部分抗冲切承载力;适当增加 Y 向下部纵筋则可促进负弯矩向跨中重分布,提高承载力,但过量会降低延性[20]。国际研究对内凹角柱和矩形板的结论也表明,不对称荷载、边界自由边和局部配筋会改变剪力场分布和板转角发展,进而影响冲切承载力及变形能力[3][4][11]。

柱截面形状、板边界条件和特殊构造则推动研究从“标准内柱”走向“真实节点”。国内型钢混凝土(SRC) T 形柱-RC 板节点试验显示,柱截面形状变化会导致冲切剪应力分布复杂化和应力集中,增加板厚和设置柱帽可有效提高冲切与残余承载力[21]。国外内凹角柱试验表明,该类节点既不同于内柱,也不同于普通边柱或角柱;荷载偏心、边缘构造和剪切钢筋布置共同决定最终破坏模式[3][4]。因此,实际建筑中大量存在的边柱、角柱、开洞边缘和异形柱节点,不能简单套用内柱轴对称模型。由此可见,板柱节点冲切性能受板厚、混凝土强度、纵筋配筋率、冲跨比、柱截面形状和边界条件等多因素共同影响,其中有效高度和受拉配筋主要通过裂缝宽度、板转角和销栓作用影响承载力,而特殊边界与异形柱则会改变剪力分布和破坏形态。因此,实际建筑中大量存在的边柱、角柱、开洞边缘和异形柱节点,不能简单套用内柱轴对称模型,影响参数研究也正由早期单变量分析逐步转向参数耦合和真实节点响应分析。

5. 抗冲切增强措施:从传统钢筋到高性能材料

抗冲切增强研究围绕的问题是:如何在提高峰值承载力的同时改善延性和失效可控性。传统抗冲切措施包括箍筋、栓钉、弯起钢筋、柱帽、托板和型钢剪力架等。唐明等的低周往复试验表明,配置抗冲切钢筋可使中节点不平衡弯矩承载力提高 13%~48%,延性提高 68%~198%,合理设计暗梁也可改善整体抗震性能[22]。这些研究奠定了“通过构造措施改变裂缝路径和传力机制”的基本思路。

随后, 钢板、钢柱帽和型钢构件被用于增强节点核心区。Xia 等提出以钢板作为抗冲切增强件, 发现钢板厚度和布置方式能提高不平衡弯矩承载力及漂移能力, 并可将破坏由应力诱发冲切转向漂移诱发冲切[23]。Lim 等的柱头钢板加固试验进一步说明外贴钢板可将承载力提高至对照试件的 1.50~2.15 倍, 但肋板屈曲会限制临界截面扩展[24]。周理等和林若凯等关于型钢混凝土板柱节点及型钢剪力架的研究表明, 型钢布置、锚固栓钉、翼缘和伸臂长度会显著影响纵筋、型钢与混凝土之间的协同工作[25] [26]。

近年来, 研究重点进一步扩展到高性能水泥基材料的局部替换。Su 等发现, 局部 ECC 增强可将普通 RC 节点的脆性冲切破坏转变为更具延性的冲切 - 弯曲复合破坏, 峰值荷载提高约 34.15%~37.76%, 延性达到普通 RC 节点的 1.82~3.34 倍[27]。Zhou 等关于 UHPFRC-NSC 组合平板的试验显示, UHPFRC 区域尺寸和纤维体积分数显著影响初始刚度、冲切强度、变形能力和破坏模式[28]。国内李创和周妍的 UHPC 局部增强试验、张耀庭等的 PE-ECC 局部替换试验, 以及 Hamoda 等关于 ECC 和 UHPECC 节点的研究均表明, 局部高性能材料能够改善裂缝分散能力、耗能能力和破坏模式[29]-[31]。总体来看, 各类增强技术主要通过改变裂缝路径、扩大有效传力范围、提高耗能能力和改善延性来提升节点性能, 体现了抗冲切设计由增加抗剪构造向优化传力机制和破坏模式的转变。

6. 抗震、预应力与高温工况下的冲切问题

多灾害和复杂工况研究回答的是: 当竖向剪力与侧移、预应力或温度退化共同作用时, 冲切机理是否发生改变。地震作用下, 板柱节点不仅承受竖向剪力, 还承受由层间位移产生的不平衡弯矩和循环损伤。国内研究表明, 空心楼盖板柱节点的布管方式、型钢剪力架和弯起钢筋会影响低周往复荷载下的承载力、滞回曲线、刚度退化和耗能能力[32]; 配置钢柱帽和屈曲约束支撑的板柱 - 支撑框架可通过支撑作为第一道防线、钢柱帽作为第二道防线来防止节点核心区破坏[33]。钢板增强节点在竖向及水平循环荷载下也显示出承载力和漂移能力提升[23]。

预应力节点的争议主要在于预压应力、等效荷载、无粘结滑移和延性之间的平衡。Qu 等对无粘结预应力板柱节点进行数值研究, 发现无粘结预应力节点与普通 RC 节点具有不同破坏形态, 预应力筋能显著提高承载力和延性, 但各国规范对预应力效应的处理存在偏差[17]。这意味着预应力贡献不能只被视为承载力增益, 还应考虑张拉力损失、应力重分布及与普通钢筋协同工作的机制。

高温和火灾后评估则进一步暴露出材料退化和界面效应的重要性。邓小芳等基于热 - 力顺序耦合模型发现, 高温冷却后 PC 板柱节点冲切承载力降低 8.1%, 但变形能力增加 58.0%; 无粘结构造因避免界面剪切应力累积而表现出更优火灾后性能[9]。钱凯等关于高温下 RC 节点的研究也表明, 受火面位置、受火时间和受火面积会改变破坏模式, 常温下冲切破坏的节点在高温下可能转为弯冲破坏[34]。上述研究表明, 侧移引起的不平衡弯矩、循环损伤、预应力效应、温度退化和界面滑移会共同影响节点承载力、变形能力和破坏模式, 说明复杂工况下的冲切问题具有明显的多因素耦合特征。

7. 连续倒塌、鲁棒性与真实荷载重分布

连续倒塌研究的主线经历了从构件失效到体系鲁棒性的转变。早期研究多采用替代路径法, 即假定某根柱失效后考察剩余结构的承载与变形能力。易伟建和水淼从体系可靠度角度分析节点冲切破坏诱发的连续倒塌, 指出底层中柱节点失效最容易引发其他节点连续破坏, 并利用条件失效概率量化不同节点重要性[35]。该研究将板柱节点从局部承载构件提升为影响体系可靠度的关键节点。

近年来, 真实事故和试验模拟推动研究者重新审视初始失效假定。Yang 等指出, 真实事故中更多初始失效来自板柱节点在超载或材料不足下的冲切失效, 而节点失效(JF)诱发倒塌与柱失效(CF)诱发倒塌具有不同阻力机制[5]。进一步的真实堆载倒塌模拟显示, 在极端超载条件下, 荷载重分布并非单向由失效

节点转移至周边节点,而可能出现阶段性反向分配和动力放大[6]。国内局部超载分析同样表明,一旦中节点破坏,周边区域连续破坏难以避免,说明节点初始失效后的残余承载力和竖向完整性是体系鲁棒性的核心[7]。

因此,板柱结构的抗倒塌评价应同时包括拆柱情形和节点冲切情形,尤其要考虑施工堆载、覆土超载、材料强度不足和局部荷载集中等实际场景。相较于仅提高峰值抗冲切承载力,更关键的是提高初始冲切后的悬挂作用、膜作用、钢筋贯通、抗冲切钢筋锚固和节点残余传力能力。

8. 数值模拟、数据驱动模型与研究方法演进

数值模拟的发展回应了试验成本高、参数覆盖有限的问题。国内研究常采用 ABAQUS、DIANA、YJK、Midas 和 SAP2000 等软件验证模型并开展参数分析,如王旭松通过 DIANA 模拟边柱节点纵筋影响[20],赵云等结合现场静载试验和 YJK 模型比较无梁楼盖承载能力计算差异[2],邹志文基于 Midas 研究无梁楼盖弯矩分配和等代梁宽度[8]。国外研究中,Alateyat 等基于三维有限元模型模拟 GFRP 筋平板,能够较好地预测极限荷载、裂缝、钢筋应变和荷载-挠度曲线[19];Zheng 等通过大量 ABAQUS 模型校核矩形平板的双向转角和剪力分配[11]。

在研究方法上,有限元分析已从单纯复现实验结果发展为解释应力场、裂缝演化和边界效应的工具。然而,其可靠性高度依赖混凝土本构模型、裂缝准则、网格尺寸、接触设置、边界条件和试验校核数据库。对于局部超载、火灾后性能和连续倒塌等问题,模型还需处理材料软化、动力效应和大变形接触等复杂非线性因素。

数据驱动方法则为承载力预测提供了新路径。国内可解释机器学习研究基于 235 个带抗剪键 RC 板柱节点试件建立 XGBoost 模型,并利用 SHAP 解释参数敏感性,发现有效高度是最关键变量,距离柱边 1.5 d 范围内抗剪键面积次之[36]。国际上关于 GFRP 筋、矩形板、内凹角柱和预应力节点等专题数据积累也为机器学习提供了潜在样本来源[3][4][11][17][19]。机器学习的优势在于处理高维非线性参数和快速预测,但如果缺乏破坏模式分类、边界条件标签和物理约束,其外推能力仍有限。总体而言,有限元方法可用于扩展参数分析、揭示应力场和裂缝演化;数据驱动模型可处理多变量非线性关系并实现快速预测。二者与试验和力学模型结合,推动研究方法由单一试验验证向“试验-数值-数据-机理”协同分析发展。

9. 中外研究差异与综合认识

中外研究差异本质上反映了工程背景和问题导向的不同。国内研究与工程事故、规范适用和工程构造联系更紧密,尤其关注地下车库覆土、施工堆载、柱帽托板、最小抗冲切配筋和现场静载检验[1][2][7]-[9]。这种研究路径具有明显的问题导向,能够直接回应工程安全和规范执行中的痛点。国际研究则更重视复杂节点类型、机械模型和精细测试技术,如内凹角柱、矩形平板、FRP 筋板、无粘结预应力节点以及真实超载倒塌试验[3]-[6][11][17][19],其优势在于模型普适性和机理解释能力较强。

二者并非相互割裂,而是具有互补关系。国内工程经验可以为国际力学模型提供真实事故边界、施工荷载和体系失效数据;国际 CSCT、MCFT 和精细试验方法可为国内规范修订提供更明确的力学基础[1][3][4][11][14][15][19][36]。在高性能材料增强方面,国内 UHPC 和 PE-ECC 试验与国外 ECC、UHPRC 和 UHPECC 研究结论高度一致,均表明局部高性能材料能够改善承载力、延性和破坏模式[27]-[31]。在连续倒塌方面,国内局部超载分析与国外真实堆载试验也共同强调,初始节点冲切后的残余传力和荷载重分布才是体系安全的关键[5]-[7]。

综合来看,板柱节点研究正在由“单点承载力比较”走向“节点-板-结构体系”的跨尺度综合评价。未来国内研究若能在真实事故数据整理、复杂边界试验和开放数据库建设方面进一步推进,将有助

于把工程经验转化为可验证、可推广的设计理论；国际模型若能更多吸收施工阶段和地下车库等真实场景，也能提高其工程适用性。国内研究更贴近地下车库事故、规范适用和工程构造，国际研究更关注机械模型、复杂节点和精细试验方法。两类研究在问题来源和方法取向上有所差异，但在高性能材料增强、连续倒塌和复杂边界节点等方向上已形成交叉互补，为后续综合研究提供了多元基础。

10. 当前研究不足与未来方向

尽管已有研究取得了丰富成果，当前板柱节点冲切研究仍有待提升。第一，试验数据库仍以标准内柱、规则边界和单调加载为主，对边柱、角柱、内凹角柱、开洞、异形柱、施工缝和局部堆载等实际情形覆盖不足，导致规范公式在复杂节点上的外推仍存在不确定性[1] [3] [4] [7] [11] [20]。第二，许多承载力模型仍以峰值荷载为主要评价指标，对冲切后的残余承载力、延性、动力放大和连续倒塌扩展机制关注不足，而真实事故往往取决于初始破坏后的荷载重分布和结构完整性[5] [6] [35]。

第三，高性能材料、钢板、型钢剪力架和预应力等增强措施虽能显著提升性能，但其成本、施工误差、界面黏结、长期耐久性和失效可检测性尚未形成统一评价框架[23] [24] [27]-[31] [34]。第四，有限元和机器学习模型在预测精度上表现良好，但本构选择、样本偏倚和物理可解释性仍制约其工程推广[11] [19] [20] [36]。第五，现有规范对施工阶段局部超载、火灾后性能、节点后冲切残余抗力和复杂边界节点的规定仍相对不足，难以完全覆盖无梁楼盖在地下车库等场景中的真实风险。

未来研究可从以下方向展开：一是建立包含真实工程边界、事故工况和后冲切响应的开放数据库；二是发展兼顾承载力、变形、残余抗力和鲁棒性的统一评价指标；三是开展复杂边界节点、局部堆载和连续倒塌全过程试验，验证节点失效诱发倒塌机制；四是将 CSCT、MCFT 等力学模型与有限元、机器学习和可靠度分析结合起来，实现物理可解释和工程可用之间的平衡；五是从成本效益和施工可控性角度评价高性能材料及钢构件增强方案，为我国无梁楼盖与板柱结构抗冲切设计提供更可靠的理论基础。

参考文献

- [1] 王立军. 中美规范无梁楼盖抗冲切设计比较及无梁楼盖事故分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(17): 50-53, 58.
- [2] 赵云, 杨潮军, 王海, 等. 某地下车库无梁楼盖原位静载荷试验研究[J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 1719-1722.
- [3] Siqueira, J.P.D.A., Albuquerque, E.J.P.D., Fernández Ruiz, M. and Melo, G.S. (2024) Punching Shear Tests in Flat Slabs Supported on Re-Entrant Corner Columns. *Engineering Structures*, **308**, Article ID: 117954. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117954>
- [4] Siqueira, J.P.D.A., Albuquerque, E.J.P.D., Fernández Ruiz, M. and Melo, G.S. (2024) Punching Shear in Flat Slabs with Re-Entrant Corner Columns and Shear Reinforcement. *Engineering Structures*, **310**, Article ID: 118098. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118098>
- [5] Yang, Z., Guo, X., Li, Y., Guan, H., Diao, M., Wang, J., et al. (2023) Progressive Collapse Mode Induced by Slab-Column Joint Failure in RC Flat Plate Substructures: A New Perspective. *Engineering Structures*, **292**, Article ID: 116506. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116506>
- [6] Yang, Z., Guo, X., Li, Y., Guan, H., Diao, M., Gilbert, B.P., et al. (2025) Real Collapse Responses of an RC Flat Plate Structure under Extreme Overloading Condition: Reversing Load Redistribution. *Engineering Structures*, **322**, Article ID: 119120. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119120>
- [7] 钟子扬, 林峰. 局部超载下地下车库混凝土板柱结构连续破坏分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 910-914.
- [8] 邹志文. 无梁楼盖计算中的弯矩分配系数及等代梁宽度研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [9] 邓小芳, 柯树炜, 兰冬璐, 等. 预应力混凝土板柱节点高温冷却后抗冲切机理研究[J/OL]. 工程力学: 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.O3.20250630.1356.012>, 2026-06-29.
- [10] Classen, M. and Kalus, M. (2023) Punching Shear Response Theory (PSRT)—A Two Degree of Freedom Kinematic Theory for Modeling the Entire Punching Shear vs. Deformation Response of RC Slabs and Footings. *Engineering Structures*, **291**, Article ID: 116197. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116197>

- [11] Zheng, B., Zheng, W., Zhang, Y. and Wang, G. (2025) Punching Failure and Analytical Model for Rectangular Flat Slabs with Equal Flexural Capacities in Orthogonal Directions. *Engineering Structures*, **323**, Article ID: 119305. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119305>
- [12] 蒋明月, 史庆轩, 景烜光, 等. 混凝土板柱节点受冲切承载力研究进展[J]. 土木工程学报, 2025, 58(9): 11-29.
- [13] 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.
- [14] 王朋, 于彬, 史庆轩, 等. 钢筋混凝土板柱节点冲切破坏模型及承载力分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(6): 852-859.
- [15] 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.
- [16] 夏成亮, 史庆轩, 赵元浩. 配置抗冲切钢筋的 RC 板柱节点受冲切承载力计算[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(2): 368-378.
- [17] Qu, T., Wu, C., Huang, L., Wu, J., Geng, T. and Zeng, B. (2025) Punching Shear Failure Behaviors of Unbonded Prestressed Slab-Column Connections: Numerical Investigation and Code Comparisons. *Advances in Structural Engineering*, **29**, 425-441. <https://doi.org/10.1177/13694332251375198>
- [18] 邸振勇, 杨新辉, 林霄. 建筑板柱结构冲切破坏试验及节点承载力分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(10): 2879-2885.
- [19] Alateyat, A., Awad, R., Metawa, A., Junaid, M.T., Altoubat, S., Maalej, M., et al. (2025) Punching Shear Behavior of GFRP-Reinforced Concrete Flat Slabs Using Finite Element Analysis. *Journal of Building Engineering*, **105**, Article ID: 112507. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112507>
- [20] 王旭松. 纵筋对无梁楼盖与边柱节点抗冲切性能的影响[J]. 工业建筑, 2023, 53(S2): 225-227.
- [21] 薛建阳, 张炜, 张翀, 等. 型钢混凝土 T 形柱-钢筋混凝土板新型节点冲切性能研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(6): 1-13.
- [22] 唐明, 易伟建, 吴超凡, 等. 抗冲切钢筋对板柱中节点抗震性能的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(3): 54-63.
- [23] Xia, C.L., Shi, Q.X., Rong, C., et al. (2024) Punching and Lateral Cyclic Behavior of Concrete Slab-Column Connections Reinforced with Steel Sheets. *Structures*, **67**, Article ID: 106928. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106928>
- [24] Lim, S., Kim, M.J., Lee, J.Y., et al. (2025) Punching Shear Strength of RC Flat Plate Slab-Column Connections Strengthened with Column Head Steel Plates. *Journal of Building Engineering*, **111**, Article ID: 113132. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113132>
- [25] 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.
- [26] 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]. 工程力学, 2024, 41(10): 156-168.
- [27] Su, Y.L., Wang, X.R., Wu, C., Xu, M.W., Ma, L. and Jin, C.H. (2025) Punching Shear Behavior of RC Slab-Column Connections Enhanced with ECC in Core Area. *Structures*, **74**, Article ID: 108567. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108567>
- [28] Zhou, Y., Shou, H., Li, C., Jiang, Y. and Tian, X. (2025) Punching Shear Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete and Normal Strength Concrete Composite Flat Slabs. *Engineering Structures*, **322**, Article ID: 119123. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119123>
- [29] 李创, 周妍. 局部采用超高性能混凝土的板柱节点抗冲切性能试验研究[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-15. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20250731.1051.002>, 2026-06-29.
- [30] 张耀庭, 万一凡, 朱大壮, 等. 局部采用高强高延性 PE-ECC 的 RC 板-柱节点拟静力试验研究[J]. 土木工程学报, 2025, 58(5): 14-26.
- [31] Hamoda, A., Abadel, A.A., Ahmed, M., Wang, V., Vrcelj, Z. and Liang, Q.Q. (2025) Punching Shear Performance of Reinforced Concrete Slab-To-Steel Column Connections Incorporating ECC and UHPECC. *Engineering Structures*, **322**, Article ID: 119145. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119145>
- [32] 庞瑞, 王璐, 倪红梅, 等. 混凝土空心楼盖板柱增强节点抗震性能试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(6): 919-928.
- [33] 王璐, 薛彦涛, 王翠坤. 配置钢柱帽的板柱-支撑框架结构抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(S2): 139-148.

-
- [34] 钱凯, 胡志俊, 翁运昊, 等. 高温下 RC 板柱节点抗冲切性能数值研究[J/OL]. 工程力学: 1-13. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20240527.1307.002>, 2026-06-29.
- [35] 易伟建, 水淼. 基于节点冲切破坏的板柱结构连续倒塌可靠性分析[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 149-155, 175.
- [36] 钱凯, 方亚洲, 何羽, 等. 基于可解释机器学习的带抗剪键 RC 板柱节点抗冲切承载力预测[J/OL]. 工程力学: 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20250616.1033.004>, 2026-06-29.