

DOI:10.11918/202312024

钢筋混凝土板柱中节点冲切破坏面割线倾角研究

郑文忠^{1,2}, 曹 棒^{1,2}, 郑博文^{1,2}, 王 英^{1,2}

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;
2. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘要: 为考察板受拉纵筋屈服的板柱节点冲切破坏情况, 提出一种新的试验方案, 该方案能够在板自由端施加力偶和板周边施加竖向荷载。基于所提试验方案, 完成了3个冲跨比和相对受压区高度不同的板柱节点冲切试验。结果表明: 3个试件达到峰值荷载时, 板受拉纵筋在柱边处均已屈服; 板受拉纵筋配筋率从1.04%增加到1.25%, 冲切破坏面割线倾角从46.3°降低到39.4°。基于本文和收集到的板柱节点冲切试验数据, 建立考虑冲跨比、混凝土轴心抗压强度、板受拉纵筋配筋率和板有效高度影响的板柱节点冲切破坏面割线倾角计算公式。并给出考虑冲跨比、相对受压区高度和冲切破坏面割线倾角影响的板柱节点受冲切承载力计算公式。

关键词: 板柱中节点; 冲切破坏面; 割线倾角; 冲跨比; 受压区高度; 受冲切承载力

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2025)05-0088-12

Research on secant inclination angle of punching failure surface of reinforced concrete interior slab-column connections

ZHENG Wenzhong^{1,2}, CAO Bang^{1,2}, ZHENG Bowen^{1,2}, WANG Ying^{1,2}

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 2. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To investigate the punching failure of slab-column connections in cases where the longitudinal tensile reinforcement of the slab yields, a novel experimental approach is proposed. This experimental setup facilitates the application of bending moments at the free end of the slab and vertical loads around the perimeter of the slab. Following this experimental design, three slab-column connection punching tests were conducted, each with varying punching span ratios and relative compression zone heights. The findings from the tests reveal that, when the specimens reached peak loads, the longitudinal tensile reinforcement in the slab had yielded near the column edge. Additionally, an increase in the ratio of longitudinal tensile reinforcement from 1.04% to 1.25% corresponded to a decrease in the secant inclination angle of the punching failure surface from 46.3° to 39.4°. Building upon the data from this study and compiled punching tests, a calculation formula was developed to determine the secant inclination angle of the punching failure surface, considering the punching span ratio, concrete compressive strength, longitudinal tensile reinforcement ratio, and slab effective depth. Furthermore, a calculation formula for the punching capacity of the slab was established, taking into consideration the punching span ratio, relative height of the compression zone, and secant inclination angle of the punching failure surface.

Keywords: interior slab-column connections; punching failure surface; secant inclination angle; punching span ratio; compression zone height; punching capacity

板柱结构最早于20世纪初出现在美国和欧洲^[1-2], 随后, 因其具有提高楼层净高、降低建造成本等优势, 在不同国家得到了广泛应用^[3-5]。当某处板柱节点发生冲切破坏, 会使得相邻板柱节点所承担的荷载增大^[6-7], 随后, 更多处板柱节点可能相

继破坏, 最终, 整个板柱结构倒塌或坍塌^[8-9]。不同学者做了大量的板柱节点冲切试验^[10-15], 但至今尚未形成统一的板柱节点冲切破坏理论模型及受冲切承载力计算方法。因此, 各国规范中板柱节点受冲切承载力计算公式均是在考虑主要因素的基础上,

收稿日期: 2023-12-11; 录用日期: 2024-03-07; 网络首发日期: 2024-05-08

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20240430.1720.005>

基金项目: 国家自然科学基金(52078162)

作者简介: 郑文忠(1965—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 王 英, wangying888@hit.edu.cn

基于试验结果拟合给出的。

板柱节点冲切锥体的外侧面即为冲切破坏面,而冲切破坏面割线倾角是指冲切破坏面下端和板受拉纵筋与冲切破坏面交点的连线与水平面的夹角。已有研究^[16]表明:板柱节点冲切破坏面割线倾角受冲跨比、混凝土强度、板受拉纵筋配筋率和板有效高度的影响。板柱节点冲切破坏面割线倾角不同,冲切破坏面周长就不同,从而使得板柱节点受冲切承载力不同。但在各国规范中,板柱节点冲切破坏面割线倾角均为一恒定值。如美国《Building code requirements for structural concrete and commentary》^[17](美国规范)和中国《混凝土结构设计规范》^[18](中国规范)均取冲切破坏面割线倾角为 45° ,英国《Structural use of concrete; code of practice for design and construction》^[19](英国规范)取冲切破坏面割线倾角为 34° ,欧洲《Design of concrete structures》^[20](欧洲规范)取冲切破坏面割线倾角为 26.6° 。

实际工程中,板柱节点发生冲切破坏时,板受拉纵筋在柱边处已屈服,而在与冲切破坏面相交处(距柱边1~2倍的板有效高度)接近屈服,板受拉纵筋销栓作用的贡献并不明显。因此,进行板柱节点冲切试验时,应基本剔除板受拉纵筋销栓作用对板柱节点受冲切承载力的贡献。以往进行板柱节点冲切试验时,为防止板发生弯曲破坏,板受拉纵筋常常配置较多,使得板柱节点受冲切承载力试验值中包含了较大的板受拉纵筋销栓作用的贡献。此外,中国规范中的板柱节点受冲切承载力计算公式没有考虑相对受压区高度和冲跨比的影响。但文献[21-22]试验结果表明:当相对受压区高度从0.15增加到0.31时,板柱节点受冲切承载力增加

了43%;当冲跨比从3增加到8时,板柱节点受冲切承载力降低了6%。综上,有必要进一步研究板柱节点冲切破坏面割线倾角及其受冲切承载力计算。

本文提出了一种新的试验方案,该方案可分别在板自由端施加力偶和预估冲切破坏面上口周边外施加竖向荷载,从而确保板柱节点发生冲切破坏时,板受拉纵筋在柱边处已屈服。利用所提试验方案,完成了3个冲跨比和相对受压区高度不同的板柱节点冲切试验。基于本文试验结果和收集到的试验结果,建立了考虑冲跨比、混凝土轴心抗压强度、板受拉纵筋配筋率和板有效高度影响的板柱节点冲切破坏面割线倾角计算公式。并给出了考虑相对受压区高度、冲跨比、板受拉纵筋销栓作用和冲切破坏面割线倾角影响的板柱节点受冲切承载力计算公式。

1 板受拉纵筋屈服的板柱节点冲切试验

1.1 试件概况

设计制作了3个冲跨比和板受拉纵筋不同的板柱节点试件。试件板的平面尺寸为 $2\ 200\text{ mm} \times 2\ 200\text{ mm}$,板厚为 350 mm 。板受拉纵筋采用HRB500钢筋,中心距为 100 mm ,混凝土保护层厚度为 25 mm 。板受拉纵筋从板端伸出 600 mm ,并在端部 100 mm 范围设置螺纹,用于固定垂直于板自由端的竖向伸臂构件。柱截面尺寸为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$,柱从板顶和板底各伸出 200 mm 和 $1\ 300\text{ mm}$ 。柱钢筋采用HRB400钢筋,纵筋为 $8\ \Phi 16$,箍筋为 $\Phi 8@150$,混凝土保护层厚度为 25 mm 。试件主要参数及混凝土标准立方体抗压强度见表1,板受拉纵筋力学性能指标见表2,试件几何尺寸和配筋如图1所示。

表1 试件主要参数

Tab.1 Main parameters of specimens

试件	板边长/mm	柱边长/mm	板有效高度/mm	混凝土标准立方体 抗压强度/MPa	板受拉纵筋配置	板受拉纵筋配筋率/%
PMS-1	2 200	500	305	45.10	$\Phi 20@100$	1.04
PMS-2	2 200	500	304	45.56	$\Phi 20/22@100$	1.14
PMS-3	2 200	500	303	45.23	$\Phi 22@100$	1.25

注:板有效高度是两个方向有效高度的平均值,板受拉纵筋配筋率是两个方向配筋率的平均值。

表2 板受拉纵筋力学性能指标

Tab.2 Mechanical performance of longitudinal tensile reinforcement of slab

钢筋牌号	直径/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
HRB500	20	568.2	759.6	200
HRB500	22	559.2	742.0	200

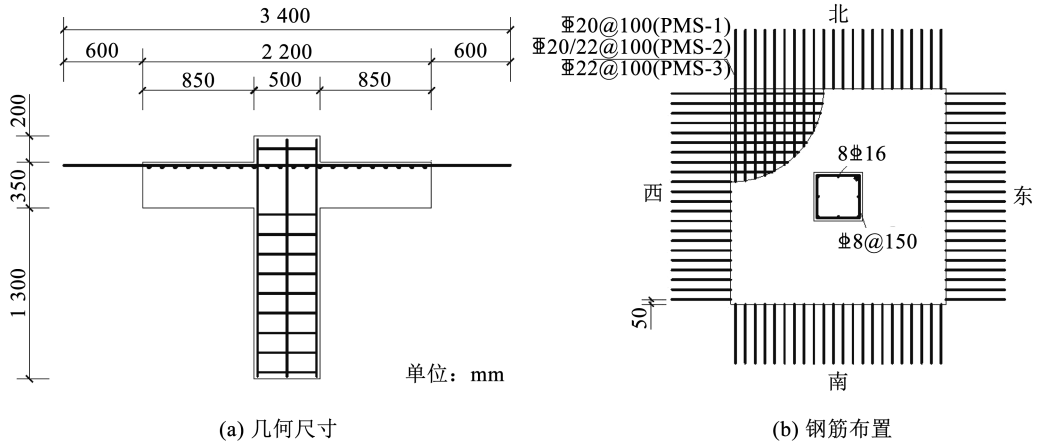


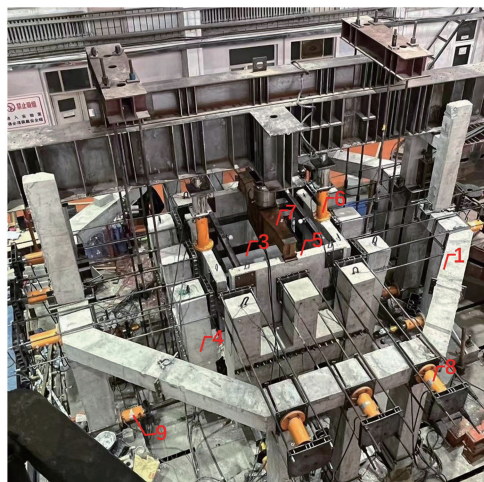
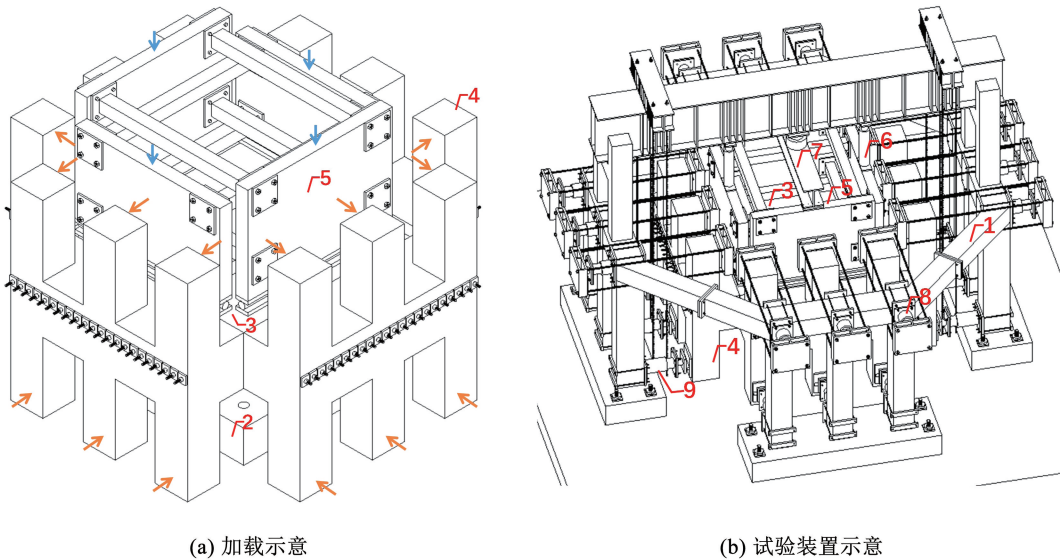
图 1 试件几何尺寸与配筋

Fig. 1 Geometric dimensions and reinforcement of specimens

1.2 加载方案与数据采集

为保证板柱节点试件发生冲切破坏时,板受拉纵筋在柱边处屈服,提出了一种新的试验方案。所

提试验方案可在板自由端施加力偶和预估冲切破坏面上口周边外施加竖向荷载,如图 2 所示。



(c) 试验现场照片

注:1—反力框;2—基座;3—板柱节点试件;4—竖向伸臂构件;5—竖向加载装置;6—竖向千斤顶;7—竖向荷载分配梁;8—上部水平千斤顶;9—下部水平千斤顶。

图 2 试件加载方案

Fig. 2 Loading scheme of specimens

竖向荷载的施加: 通过 1 个竖向千斤顶和 1 个竖向荷载分配梁在竖向加载装置的两侧混凝土墙体顶部中心位置施加竖向荷载, 通过另两个竖向千斤顶分别在竖向加载装置的另两侧混凝土墙体顶部中心位置施加竖向荷载, 从而在板四边 (预估冲切破坏面上口周边外) 施加竖向荷载。

板每侧自由端力偶的施加: 通过 3 个上部水平

千斤顶对竖向伸臂构件上方施加向外的水平推力, 并通过 3 个下部水平千斤顶对竖向伸臂构件下方施加向内的水平推力, 从而实现板每侧自由端力偶的施加。

为实现上述加载方案, 设计制作了 1 个基座、4 个竖向伸臂构件、1 个竖向加载装置和 1 个反力框, 如图 3 所示。基座、竖向伸臂构件、竖向加载装置和反力框均可重复使用。

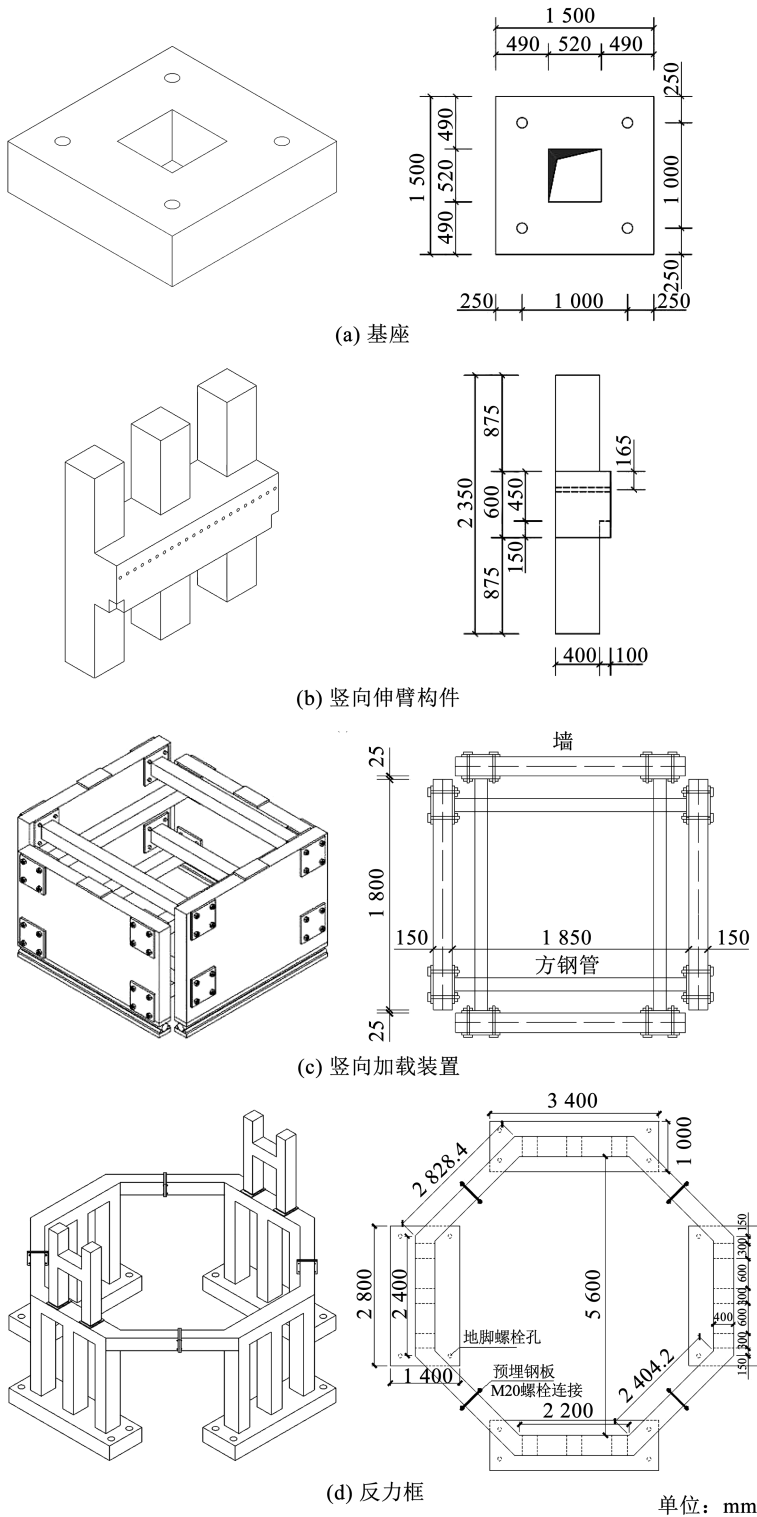
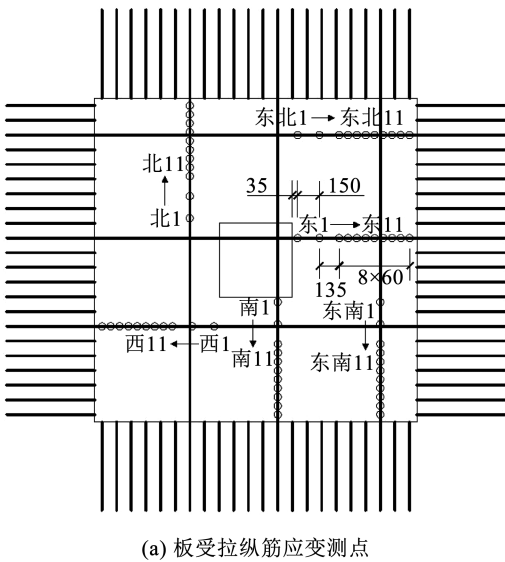


图 3 试验配套装置示意

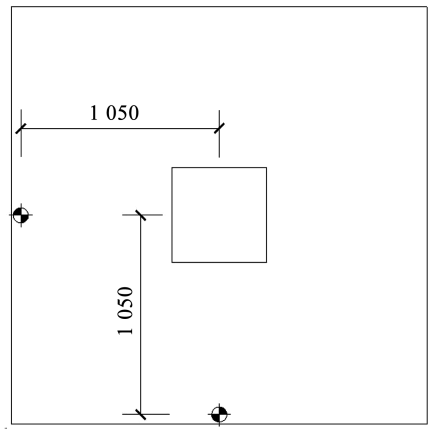
Fig. 3 Schematic diagram of supporting device for the test

加载前期,竖向荷载和板自由端力偶同步增大,即按照剪力与受冲切承载力预估值之比和板柱边处弯矩与受弯承载力之比成比例增加。板受拉纵筋在柱边处屈服后,为防止板发生弯曲破坏,按照板柱边处弯矩不变原则,减小板自由端力偶和增大竖向荷载,直至板发生冲切破坏。试件未开裂前,竖向荷载每级增量为 10 kN;试件开裂后,竖向荷载每级增量为 40 kN;板受拉纵筋在柱边处屈服后,竖向荷载每级增量为 20 kN,直至试件破坏。

采用上海华东电子仪器厂生产的力传感器测量荷载大小,采用河北省邢台金志传感元件厂制造的钢筋应变片测量应变,采用天津泰斯特仪器有限公司的电阻式位移计测量位移。在距柱边 35 mm 和 185 mm 处各布置 1 个钢筋应变测点,并在距柱边 285 ~ 750 mm 间隔 60 mm 布置 9 个钢筋应变测点,板受拉纵筋应变测点布置见图 4(a)。在板底西侧和南侧分别布置了距柱中心 1 050 mm 的位移计,如图 4(b)所示。



(a) 板受拉纵筋应变测点



(b) 位移测点

单位: mm

图 4 应变和位移测点布置

Fig. 4 Layout of strain and displacement measurement points

1.3 试验结果

图 5 给出了加载过程中,3 个试件一根板受拉纵筋应变的变化曲线,未给出的应变测点是由于该处应变片在试验前已失效。可以看出,当竖向荷载达到峰值时,板受拉纵筋在靠近柱边处的应变均大于屈服应变。根据文献[13]可知,3 个试件的受冲切承载力试验值中基本不包含板受拉纵筋销栓作用的贡献。

加载过程中,3 个试件的荷载 - 位移曲线如图 6 所示。3 个试件发生破坏前,板位移较小。试件破坏瞬间,板内形成冲切锥体从板中冲出,且破坏突然发生。根据文献[23],板柱节点破坏模式分为弯曲破坏、板受拉纵筋屈服的冲切破坏和板受拉纵筋未屈服的冲切破坏。对于弯曲破坏,整个板受拉纵筋先屈服,随后在经历较大的塑性变形后发生冲切,其承载力由受弯承载力控制。对于板受拉纵筋屈服的

冲切破坏,部分板受拉纵筋在柱边处先屈服,随后在整个板受拉纵筋屈服之前发生冲切,其承载力低于受弯承载力。对于板受拉纵筋未屈服的冲切破坏,冲切在板受拉纵筋屈服之前以非常脆的方式发生,其承载力明显低于受弯承载力。综上可知,3 个试件的破坏模式为板受拉纵筋屈服的冲切破坏。3 个试件的开裂荷载和峰值荷载见表 3,试件破坏后的冲切锥体分别如图 7 ~ 9 所示。可以看出,3 个试件的冲切破坏面与水平面的夹角沿板厚方向均存在一定变化。为便于分析,将板柱节点冲切破坏面下端和板受拉纵筋与冲切破坏面交点的连线与水平面的夹角定义为板柱节点冲切破坏面割线倾角。此外,不同侧的冲切破坏面割线倾角也存在差异(见表 4)。因此,板柱节点冲切破坏面割线倾角取东侧、南侧、西侧和北侧冲切破坏面割线倾角的平均值。

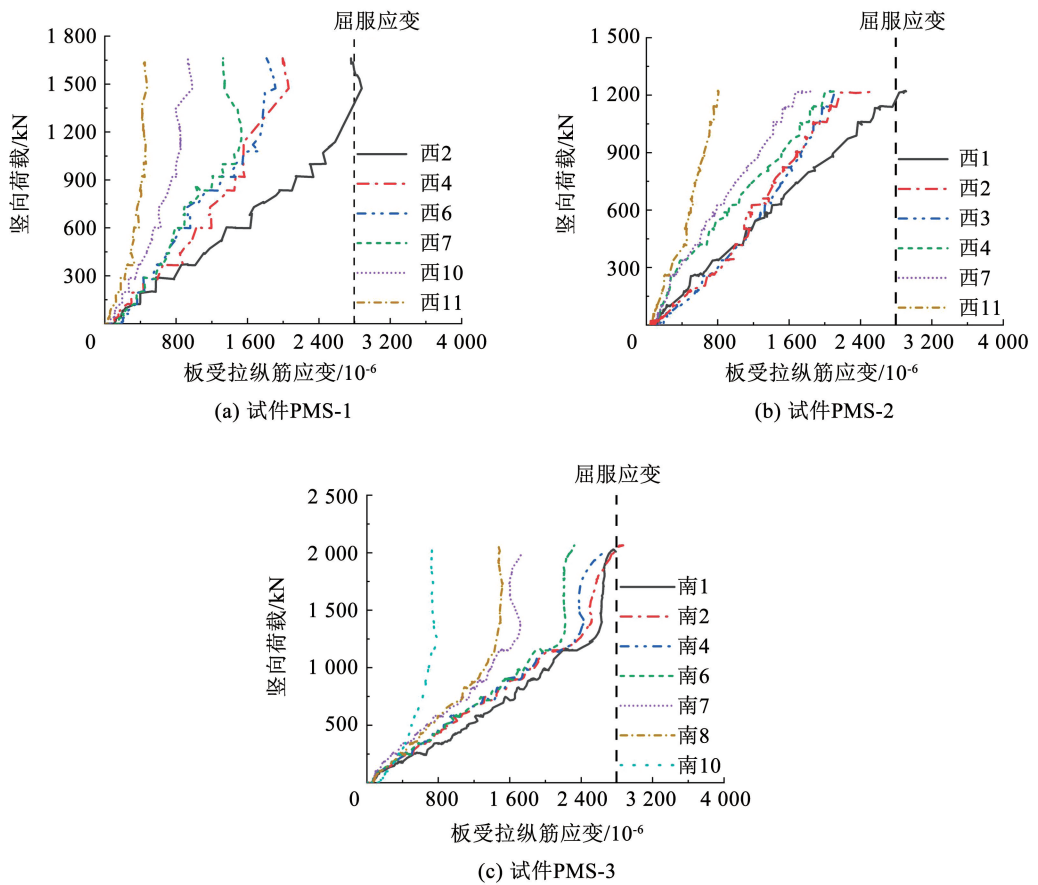


图5 板受拉纵筋应变测量结果

Fig. 5 Strain measurement results of longitudinal tensile reinforcement of slab

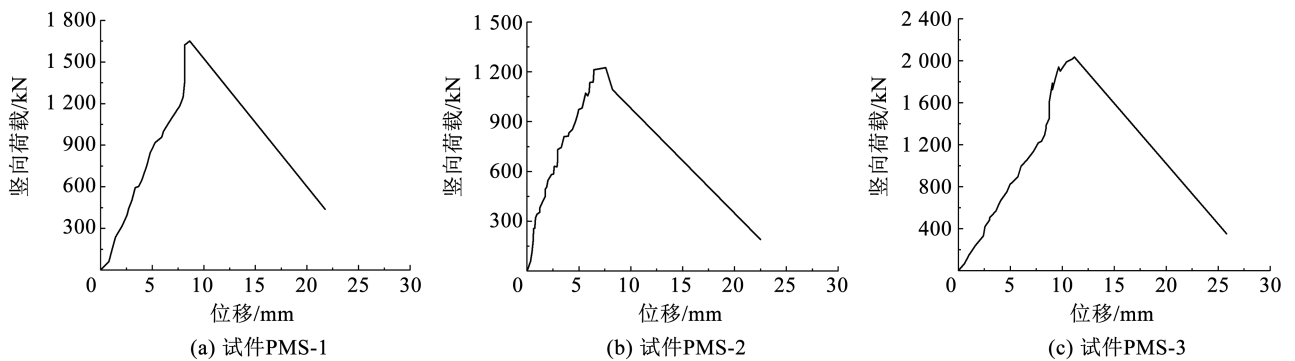


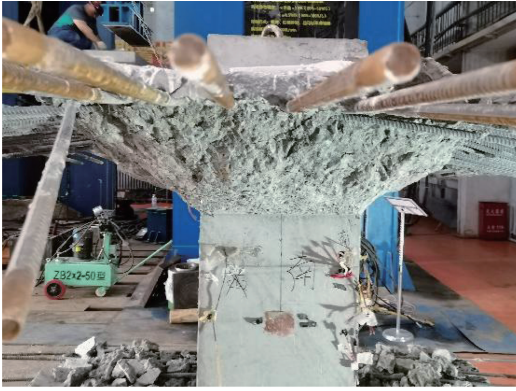
图6 板底面位移点的测量结果

Fig. 6 Measurement results of displacement points on the bottom surface of slab

表3 开裂荷载和峰值荷载
Tab. 3 Cracking load and peak load

试件	V_{cr}/kN	$M_{cr}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	V_u/kN	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$
PMS-1	589	242	1 879	477
PMS-2	323	143	1 447	652
PMS-3	472	221	2 279	530

注: V_{cr} 为开裂时的竖向荷载 (含自质量), M_{cr} 为开裂时的板柱边截面弯矩 (含自质量), V_u 为峰值荷载时的竖向荷载 (含自质量), M_u 为峰值荷载时的板柱边截面弯矩 (含自质量)。



(a) 锥体的北侧



(b) 锥体的东侧



(c) 锥体的西北侧



(d) 锥体的西南侧

图 7 试件 PMS-1 的冲切锥体

Fig. 7 Punching cone of specimen PMS-1



(a) 锥体的北侧



(b) 锥体的东侧



(c) 锥体的西北侧



(d) 锥体的西南侧

图 8 试件 PMS-2 的冲切锥体

Fig. 8 Punching cone of specimen PMS-2



图9 试件 PMS-3 的冲切锥体

Fig. 9 Punching cone of specimen PMS-3

表4 3个试件冲切破坏面的各侧割线倾角

Tab. 4 Secant inclination angle of punching failure surface on each side of three specimens

试件	板柱节点冲切破坏面割线倾角/(°)							
	南侧	北侧	东侧	西侧	东北侧	东南侧	西南侧	西北侧
PMS-1	36.7	39.6	58.2	42.5	56.8	56.3	40.1	42.0
PMS-2	34.8	33.7	27.1	47.2	46.8	52.4	33.2	35.7
PMS-3	34.3	44.6	38.8	39.4	40.2	39.9	39.9	38.5

2 板柱节点冲切破坏面割线倾角计算

2.1 试验数据库

收集相关文献^[8,21,26-29],建立了板柱节点冲切试验数据库。每组试验数据应包含以下参数:板边长 L 、柱形状、柱截面边长 c 或直径 D 、板截面有效高度 h_0 、混凝土标准立方体抗压强度 f_{cu} 、板受拉纵筋配筋率 ρ 及其屈服强度 f_y 、破坏时的竖向荷载 V_u 和冲切破坏面割线倾角 θ 。由于不同文献在试验设计和材料性能指标的测量方法等方面存在差异,作如下说明:

- 1) 试件均为中柱节点;
- 2) 试件未配置抗冲切钢筋;
- 3) 试件均不设梁、托板和柱帽,且板内没有开洞;
- 4) 试件所采用的混凝土均为普通混凝土;
- 5) 测

得的混凝土标准圆柱体抗压强度统一换算为混凝土标准立方体抗压强度,换算关系为 $f_c = 0.8f_{cu}$; 6) 冲跨比等于板柱边处截面弯矩 M_1 与剪力 V_1 和有效高度乘积之比,为便于分析,取板两个方向有效高度的均值计算冲跨比,即

$$\lambda = \frac{M_1}{V_1 h_0} \quad (1)$$

共搜集了29组符合上述条件的板柱节点冲切试验,数据汇总见表5。板柱节点冲切试验数据库中的试件板边长为1 200~6 000 mm,柱边长为130~520 mm,冲跨比为2.00~10.35,板截面有效高度为96~456 mm,混凝土标准立方体抗压强度为26.4~70.1 MPa,板受拉纵筋配筋率为0.25%~1.73%,板受拉纵筋屈服强度为454~604 MPa。

表 5 板柱中节点冲切试验数据库
Tab. 5 Punching database of interior slab-column connections

数据来源	试件编号	L/mm	柱形状	c 或 D/mm	f_y/MPa	$\rho/\%$	λ	h_0/mm	f_{cu}/MPa	V_u/kN	$\theta/(\circ)$
Beutel 等 ^[26]	P1	2 750	方柱	400	572	0.81	6.83	190	28.9	615	30.0
	PG-1	3 000	方柱	260	573	1.50	8.86	210	34.5	1 023	22.4
	PG-2b	3 000	方柱	260	552	0.25	8.86	210	50.6	440	32.0
	PG-3	6 000	方柱	520	520	0.33	8.16	456	40.5	2 153	34.8
Guandalini 等 ^[21]	PG-4	3 000	方柱	260	541	0.25	8.86	210	40.3	408	33.2
	PG-6	1 500	方柱	130	526	1.50	9.69	96	43.4	238	24.6
	PG-7	1 500	方柱	130	550	0.75	9.30	100	43.4	241	24.2
	PG-10	3 000	方柱	260	577	0.33	8.86	210	35.6	540	22.8
	PG-11	3 000	方柱	260	570	0.75	8.86	210	39.4	763	28.2
	SC1	2 550	圆柱	300	514	0.71	10.02	150	41.7	490	26.0
	SC2	2 550	圆柱	300	514	0.93	10.02	150	44.3	599	34.1
邓清 ^[8]	SC3	2 550	圆柱	300	514	1.71	10.02	150	42.9	665	28.8
	SC4	2 550	圆柱	300	514	0.71	10.02	150	56.0	574	26.5
	SC5	2 550	圆柱	300	514	0.93	10.02	150	59.1	649	26.0
	SC6	2 550	圆柱	300	514	1.71	10.02	150	64.9	761	25.2
	DF11	1 200	方柱	200	528	0.86	1.64	395	26.8	2 813	56.0
Siburg 等 ^[27]	DF12	1 400	方柱	200	566	0.85	2.00	395	26.5	2 208	48.0
	DF13	1 800	方柱	200	558	0.84	2.72	395	26.4	1 839	43.0
	C5-30-1	1 950	方柱	250	604	0.86	7.52	150	34.8	678	33.0
	C5-30-2	1 950	方柱	250	604	0.86	7.52	150	33.9	692	21.5
彭检 ^[28]	C7-30-1	2 550	方柱	250	604	1.28	10.35	150	32.3	443	30.2
	C7-30-2	2 550	方柱	250	604	1.28	10.35	150	29.7	570	28.9
	C7-50-1	2 550	方柱	250	604	1.28	10.35	150	53.0	693	36.7
	C7-50-2	2 550	方柱	250	604	1.28	10.35	150	48.6	771	27.6
	C7-70-1	2 550	方柱	250	454	0.86	10.35	150	70.1	641	33.2
洪枫 ^[29]	C7-30-3	2 550	方柱	250	454	1.73	10.35	150	35.6	690	29.3
	PMS-1	2 200	方柱	500	568	1.04	4.53	305	45.1	1 879	44.3
本文	PMS-2	2 200	方柱	500	568	1.14	7.22	304	45.6	1 447	35.7
	PMS-3	2 200	方柱	500	559	1.25	4.36	303	45.2	2 279	39.3

2.2 计算公式的拟合

由于板柱节点冲切破坏面割线倾角与各因素并非线性关系,经过多次尝试,采用如下形式进行板柱节点冲切破坏面割线倾角的拟合:

$$\theta = (A - B\lambda^C) \left(\frac{f_c}{22} \right)^D (100\rho)^E \left(\frac{h_0}{150} \right)^F \quad (2)$$

式中: f_c 为混凝土轴心抗压强度, A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 为需要拟合的系数。

以冲跨比和板有效高度为两个横轴, $\theta/[(f_c/22)^D(100\rho)^E]$ 为纵轴,建立三维直角坐标系。将收集到的试验数据布置于该三维坐标系中进行拟合,得到了板柱节点冲切破坏面割线倾角计算公式,拟合效果如图 10 所示。

$$\theta = (69 - 22.8\lambda^{0.3}) \left(\frac{f_c}{22} \right)^{0.3} (100\rho)^{-0.1} \left(\frac{h_0}{150} \right)^{0.138} \quad (3)$$

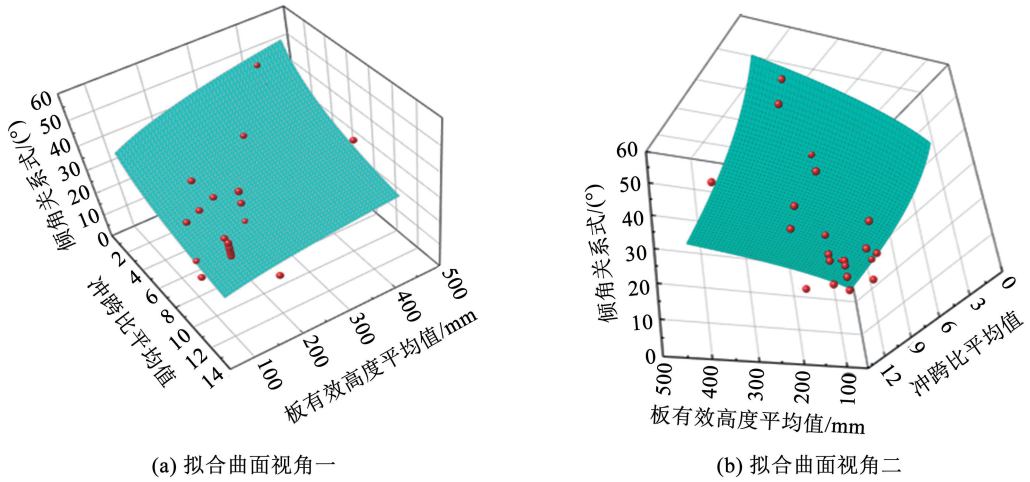


图 10 冲切破坏面割线倾角的拟合曲面

Fig. 10 Fitting surface of secant inclination angle of punching failure surface

对不同文献中的板柱节点冲切破坏面割线倾角公式与本文建议公式的计算结果进行了对比, 见表 6。第 1 个公式为邓清^[8]基于板柱节点冲切试验结果, 拟合给出的考虑相对受压区高度影响的板柱节点冲切破坏面割线倾角计算公式。第 2 个公式是林旭健等^[10]通过理论推导给出的考虑混凝土有效抗拉强度和有效抗压强度影响的板柱节点冲切破坏面割线倾角计算公式。最后 1 个公式是 Bompa 等^[11]基于板柱节点冲切试验结果和有限元模拟结果, 拟合给出的考虑相对受压区高度和板尺寸效应影响的板柱节点冲切破坏面割线倾角计算公式。结果表明, 本文建议公式给出的计算值与试验值更为吻合, 具有最小的变异系数, 见表 6。

表 6 冲切破坏面割线倾角试验值与不同公式计算值的比较
Tab.6 Comparison of secant inclination angle experimental results and prediction results using different formulas

试验值与计算值之比	邓清公式	林旭健公式	Bompa 公式	本文建议公式
平均值	1.00	0.98	1.21	1.06
变异系数	0.21	0.21	0.22	0.19

3 板柱节点受冲切承载力计算

根据文献[13], 对于板受拉纵筋未屈服的板柱节点冲切破坏, 板受拉纵筋销栓作用对其受冲切承载力具有一定的贡献。此外, 文献[15]表明: 板柱节点达到峰值荷载时, 冲切斜裂缝宽度较大, 裂缝间的混凝土骨料咬合作用对板柱节点受冲切承载力的贡献较小。因此, 忽略混凝土骨料咬合作用对板柱节点受冲切承载力的贡献, 即认为板柱节点受冲切承载力 V_u 由受压区混凝土的贡献 V_c 和板受拉纵筋

高于拉应力的剩余强度所提供的销栓作用的贡献 V_d 组成, 如图 11 所示。

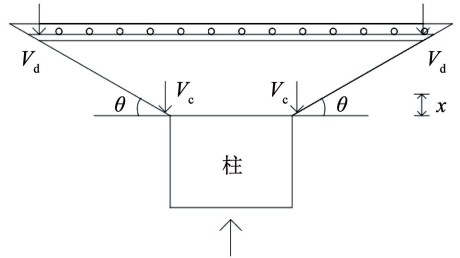


图 11 板柱节点冲切计算模型

Fig. 11 Calculation model for punching of slab-column connections

因此, 板柱节点受冲切承载力按下式计算:

$$V_u = V_c + V_d \quad (4)$$

板受拉纵筋销栓作用对板柱节点受冲切承载力的贡献按 Randl^[24] 和 Yang^[25] 提出的公式计算:

$$V_{da,c} = 1.64(4c + 4h_0 \cot \theta - nd) d \sqrt[3]{f_c} \quad (5)$$

$$V_{da,s} = nV_{da,si} = n \frac{1.5\pi}{4} d^2 \sqrt{f_s f_y} \sqrt{1 - \left(\frac{\varepsilon_s E_s}{f_y}\right)^2} \geq 0 \quad (6)$$

$$\varepsilon_s = \frac{2M_1}{\rho L h_0 E_s x} \quad (7)$$

$$x = \frac{E_s}{E_c} \rho h_0 \left(\sqrt{1 + \frac{2E_c}{\rho E_s}} - 1 \right) \quad (8)$$

$$V_d = \min(V_{da,c}, V_{da,s}) \quad (9)$$

式中: n 为与冲切破坏面相交的板受拉纵筋数量, d 为板受拉纵筋直径, E_s 为板受拉纵筋弹性模量, E_c 为混凝土弹性模量。

参考中国规范, 并考虑相对受压区高度和冲跨比对板柱节点受冲切承载力的影响。经过多次尝试, 确定了受压区混凝土对板柱节点受冲切承载力

贡献计算公式的拟合形式,式中包含 3 个拟合系数 A 、 B 和 C :

$$V_c = (A - \lambda^B) 4(c + h_0 \cot \theta) h_0 f_t \left(\frac{\rho f_y}{f_c} \right)^C \left(\frac{400}{h_0} \right)^{0.25} \quad (10)$$

分别以 $\rho f_y / f_c$ 和 λ 为横轴, $V_c / [4f_t(c + h_0 \cot \theta) h_0 \left(\frac{400}{h_0} \right)^{0.25}]$ 为纵轴,建立三维直角坐标系。将试验点布置于该三维直角坐标系中,拟合得到了受压区混凝土对板柱节点受冲切承载力贡献的计算公式:

$$V_c = 4f_t(c + h_0 \cot \theta) h_0 \left(\frac{400}{h_0} \right)^{0.25} (1.85 - \lambda^{0.17}) \left(\frac{\rho f_y}{f_c} \right)^{0.1} \quad (11)$$

对中国规范、美国规范、英国规范、欧洲规范和建议公式进行了对比,结果见表 7。可以看出,中国规范和美国规范的变异系数较大,这是由于中国规范和美国规范中的板柱节点受冲切承载力计算公式并未包含板受拉纵筋和冲跨比的影响。建议公式计算结果与试验结果最接近,并且变异系数最小。此外,建议公式考虑了冲跨比、相对受压区高度、板受拉纵筋销栓作用和冲切破坏面割线倾角的影响。

表 7 受冲切承载力试验值与不同公式计算值的比较

Tab.7 Comparison between experimental and predicted results of punching capacity based on different formulas

试验值与计算值之比	中国规范	美国规范	英国规范	欧洲规范	建议公式
平均值	1.03	1.16	1.36	1.49	1.03
变异系数	0.41	0.40	0.21	0.21	0.19

4 结 论

1) 基于所提试验方案,完成了 3 个冲跨比和相对受压区高度不同的板柱节点冲切试验。结果表明:所提试验方案能够确保板柱节点试件发生冲切破坏时,板受拉纵筋在柱边处屈服;3 个试件的受冲切承载力试验值中不包含板受拉纵筋销栓作用的贡献;板受拉纵筋配筋率是影响板柱节点冲切破坏面割线倾角的重要因素,板受拉纵筋配筋率从 1.04% 增加到 1.25%,冲切破坏面割线倾角从 44.3° 降低到 39.3°。

2) 基于本文试验数据和收集到的试验数据,给出了考虑冲跨比、混凝土轴心抗压强度、板受拉纵筋配筋率和板有效高度影响的板柱节点冲切破坏面割线倾角计算公式。与已有板柱节点冲切破坏面割线倾角计算公式相比,本文建议公式与试验结果更吻合。

3) 考虑受压区混凝土和板受拉纵筋销栓作用

对板柱节点受冲切承载力的贡献,拟合给出了考虑冲切破坏面割线倾角、冲跨比、板受拉纵筋销栓作用和相对受压区高度影响的板柱节点受冲切承载力计算公式。与国内外规范的板柱节点受冲切承载力计算公式相比,本文建议公式与试验结果最吻合。

参 考 文 献

- [1] GASPARINI D A. Contributions of C. A. P. Turner to development of reinforced concrete flat slabs 1905—1909 [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(10): 524. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:10(1243)
- [2] FURST A, MARTI P. Robertmaillart's design approach for flat slabs [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(8): 1102. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:8(1102)
- [3] 丁泽龙, 黄仲康. 整体预应力板柱结构试验住宅结构设计[J]. 四川建筑科学研究, 1980(2): 15
DING Zelong, HUANG Zhongkang. Structural design of an experimental dwelling house with prefabricated prestressing concrete skeleton [J]. Sichuan Building Science, 1980(2): 15
- [4] PARK T W. Inspection of collapse cause of sampoong department store [J]. Forensic Science International, 2012, 217(1/2/3): 119. DOI: 10.1016/j.forsciint.2011.10.039
- [5] BYFIELD M, MUDALIGE W, MORISON C, et al. A review of progressive collapse research and regulations [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, 2014, 167(SB8): 447. DOI: 10.1680/stbu.12.00023
- [6] 郭晓林, 刘广义, 曹声远, 等. 钢筋混凝土板冲切破坏机理的试验研究及冲切承载力计算 [J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1993, 26(6): 74
GUO Xiaolin, LIU Guangyi, CAO Shengyuan, et al. An experimental study on the punch-shear damage mechanism of R. C slabs and punch-shear bearing capacity calculation [J]. Journal of Haerbin Architecture and Civil Engineering Institute, 1993, 26(6): 74
- [7] 严宗达. 用双剪强度理论解混凝土板冲切的轴对称问题 [J]. 工程力学, 1996(1): 1
YAN Zongda. Solution of the axisymmetrical punching problem of concrete slab by the twin shear strength theory [J]. Engineering Mechanics, 1996(1): 1
- [8] 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
- [9] 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
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. DOI: 10.11918/202106064
- [10] 林旭健, 郑作樵, 钱在兹. 钢纤维高强混凝土冲切板的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 72
LIN Xujian, ZHENG Zuoqiao, QIAN Zaici. Research on steel fiber high-strength concrete slab subjected to punching shear [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(5): 72. DOI: 10.3321/j.issn:

- 1000-6869.2003.05.010
- [11] BOMPA D V, TRAIAN O. Punching shear strength of RC flat slabs at interior connections to columns [J]. Magazine of Concrete Research, 2016, 68; 24. DOI: 10.1680/MACR.14.00402
- [12] THEODORAKOPOULOS D, SWAMY R N. Ultimate punching shear strength analysis of slab-column connections [J]. Cement and Concrete Composites, 2002, 24(6): 509. DOI: 10.1016/S0958-9465(01)00067-1
- [13] KUERES D, HEGGER J. Two-parameter kinematic theory for punching shear in reinforced concrete slabs without shear reinforcement [J]. Engineering Structures, 2018, 175(15): 201. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.08.023
- [14] TRUONG G T, CHOI K K. Punching strength of concrete footings based on the compression zone failure mechanism [J]. Structures Buildings, 2020, 173(7): 523. DOI: 10.1680/jstbu.17.00135
- [15] BROMS C E. Tangential strain theory for punching failure of flat slabs [J]. ACI Structural Journal, 2016, 113(1): 95. DOI: 10.14359/51687942
- [16] 郑文忠,王刚,王英. 板柱节点承载力计算方法研究进展 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(10): 1
ZHENG Wenzhong, WANG Gang, WANG Ying. Research progress in bearing capacity calculation methods of slab-column connections [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(10): 1. DOI: 10.11918/202112116
- [17] ACI Committee. Building code requirements for structural concrete: ACI 318-19 [S]. Farmington Hill: American Concrete Institute, 2019
- [18] 中国建筑工程总公司. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
China Construction Engineering Corporation. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010
- [19] Structural use of concrete: BS8110 [S]. London: British Standards Institution, 1997
- [20] Eurocode 2 EN 1992-1-1. Design of concrete structures-Part 1-1: general rules and rules for buildings [S]. Brussel: Belgium, 2004
- [21] GUANDALINI S, BURDET O L, MUTTONI A. Punching tests of slabs with low reinforcement ratios [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(1): 87. DOI: 10.14359/51701089
- [22] EINPAUL J, BUJNAK J, RUIZ M F, et al. Study on influence of column size and slab slenderness on punching strength [J]. ACI Structural Journal, 2016, 113(1): 135. DOI: 10.14359/51687945
- [23] MUTTONI A. Punching shear strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(4): 440. DOI: 10.14359/19858
- [24] RANDL N. Tragverhalten einbetonierter scherbolzen [J]. Beton-Stahlbetonbau, 2005, 100(6): 467. DOI: 10.1002/best.200590117
- [25] YANG Yuguang. Shear behaviour of reinforced concrete members without shear reinforcement: a new look at an old problem [D]. Delft: Technische Universiteit Delft, 2014. DOI: 10.4233/uuid:ac776cf0-4412-4079-968f-9each67e8846
- [26] BEUTEL R, HEGGER J. The effect of anchorage on the effectiveness of the shear reinforcement in the punching zone [J]. Cement and Concrete Composites, 2002, 24(6): 539. DOI: 10.1016/S0958-9465(01)00070-1
- [27] SIBURG C, HEGGER J. Experimental investigations on the punching behaviour of reinforced concrete footings with structural dimensions [J]. Structural Concrete, 2014, 15(3): 331. DOI: 10.1002/suco.201300083
- [28] 彭检. 钢筋混凝土板柱节点抗冲切试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013
PENG Jian. Experimental study on punching shear failure of reinforced concrete slabs-column connections [D]. Changsha: Hunan University, 2013. DOI: 10.7666/d.Y2355595
- [29] 洪枫. 钢筋混凝土板柱节点冲切破坏试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015
HONG Feng. Experimental study on punching shear failure of reinforced concrete slabs-column connection [D]. Changsha: Hunan University, 2015

(编辑 刘彤)