

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.052



# 配栓钉的钢筋混凝土双向板受力性能试验研究

金玉<sup>1,2</sup>, 易伟建<sup>1</sup>, 胡岚<sup>1</sup>, 马克俭<sup>1,3</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院 长沙 410082; 2. 嘉兴学院 建筑工程学院, 浙江 嘉兴 314001;  
3. 贵州大学 空间结构研究中心, 贵阳 550003)

**摘要:**为研究配置不同参数栓钉钢筋混凝土双向板的受力性能,完成了 7 块配置栓钉的双向板柱节点冲切试验,主要研究栓钉间距、直径、高度、强度和布置形式等参数变化对受力性能的影响,采用静力加载方式模拟配置栓钉的板柱节点破坏全过程。对比分析试验结果发现,增大栓钉直径、栓钉高度或提高栓钉强度均能改善试件抗冲切性能,其中,增大直径效果最为明显,抗变形能力提高幅度达到 36%;加大栓钉间距和减小栓钉高度对改善试件抗冲切性能不利,承载能力和抗变形能力均有不同程度降低;对比 3 种不同栓钉布置形式发现,采用相同数量栓钉放射布置和增加每圈栓钉数量的正交布置,均有利于提高试件抗冲切能力,但前者更经济。对比分析相关规范计算结果和试验结果发现,规范对配栓钉板柱结构的计算结果具有足够的安全储备,但对于反映试验结果的实质不够充分,特别是栓钉对板的抗冲切性能的贡献有所低估。

**关键词:**栓钉;板柱节点;钢筋混凝土;双向板;受力性能;试验研究

**中图分类号:** TU375.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 2096-6717(2019)03-0077-08

## Experimental analysis on mechanical performances of reinforced concrete two-way slab with studs

Jin Yu<sup>1,2</sup>, Yi Weijian<sup>1</sup>, Hu Lan<sup>1</sup>, Ma Kejian<sup>1,3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China;  
2. Architecture Engineering College, Jiaxing University, Jiaxing 314001, Zhejiang, P. R. China;  
3. Research Center of Space Structure, Guizhou University, Guiyang 550003, P. R. China)

**Abstract:** This paper aims to study the mechanical performances of reinforced concrete two-way slab with different stud parameters. The experimental study on seven reinforced concrete two-way slab-column connections with punching shear studs was conducted. The main parameters investigated were spacing of stud, the diameter of the stud, the height of the stud, the strength of the stud and the arrangement of the stud. The whole process of damage of slab-column connections with studs was simulated using static loading method. The results show that increasing the diameter of the stud, the height of the stud or the strength of the stud can improve the anti-punching shear performance of the specimen. The increase in diameter is the most obvious, and the decrease in deformation is up to 36%. Increasing stud spacing and

**收稿日期:** 2018-12-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(51178175, 51338004)

**作者简介:** 金玉(1981-), 男, 博士生, 主要从事混凝土结构基本理论研究, E-mail: jinyu@hnu.edu.cn.

易伟建(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: weijiany@hnu.edu.cn.

**Received:** 2018-12-29

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51178175, 51338004)

**Author brief:** Jin Yu (1981-), PhD candidate, main research interest: concrete structural basic theory, E-mail: jinyu@hnu.edu.cn.

Yi Weijian (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: weijiany@hnu.edu.cn.

reducing stud height weaken the load-bearing capacity and thus the deformation are increased. By comparing three different stud layouts, it is found that using radiation type contributes better to the improvement of the specimen anti-punching shear capacity, and the former was more economical. Then, the accuracy of the test results was verified by comparing the calculated results of relevant specifications with the test results. The results show that the safety reserve of specification calculation results of slab-column structure with studs is sufficient. However, it is not enough to reflect the nature of test results, especially contributions of the stud to anti-punching shear performance of slabs are underestimated.

**Keywords:** studs; slab-column connections; reinforced concrete; two-way slab; mechanical performances; experimental study

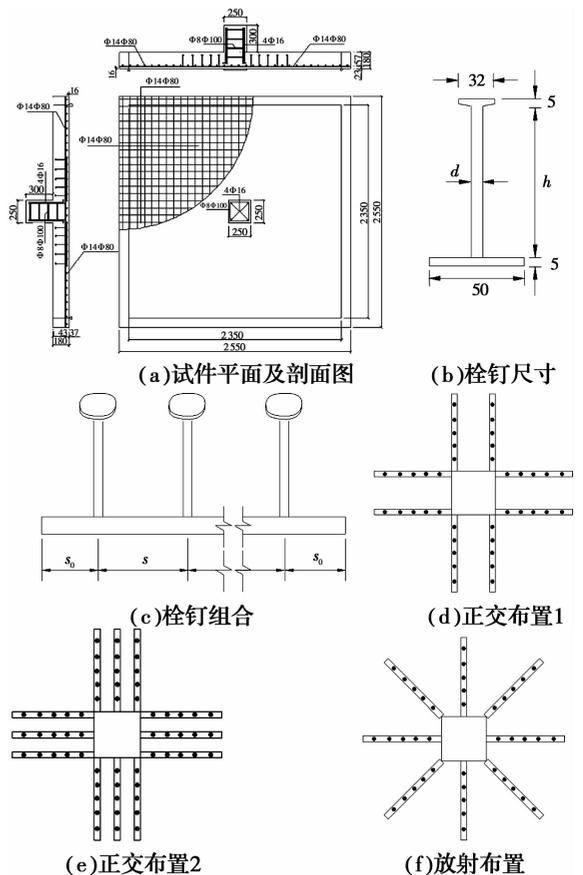
钢筋混凝土板柱结构在连接处往往因承受较大剪力和弯矩而发生脆性冲切破坏,已有研究表明,配置抗冲切钢筋能显著提高和改善板柱节点处的抗冲切承载能力和变形性能。板柱冲切问题一直是工程界较为关心的经典问题之一,学者们对采用冲切钢筋的板柱连接性能进行了大量研究<sup>[1-4]</sup>,也尝试研究过不同形式的抗冲切钢筋,包括箍筋、弯曲钢筋、型钢剪力架、抗剪格栅、U形箍筋、双头锚箍筋、钢筋连成的栓钉等。尽管抗冲切钢筋形式多样,但各国规范采用的抗冲切钢筋形式却不多,也不统一,如美国规范<sup>[5]</sup>推荐采用封闭箍筋和型钢剪力架,中国规范<sup>[6]</sup>则推荐使用封闭箍筋和弯起钢筋。为了安装方便和提升抗冲切效果,学者们仍在对新型抗冲切钢筋进行不断尝试和研究,如 Yamada 等<sup>[7]</sup>对帽式钢筋和双钩钢筋两种新型抗冲切钢筋进行试验研究,发现帽式钢筋安装方便,但锚固不足,后者抗冲切性能尚可,但施工比较麻烦。

Ghali<sup>[8]</sup>最早提出栓钉锥形,并对工字形型钢的小切段作为抗冲切钢筋进行了较深入的试验研究<sup>[9]</sup>,结果表明,这种抗冲切钢筋可有效防止冲切破坏。由于栓钉具有易于安装、利于实现工厂标准化生产和良好的经济性,在欧美国家已得到广泛应用。鉴于栓钉的独特优势,学者们<sup>[10-12]</sup>依据相关研究成果提出了设计建议。中国的研究相对较少,其中,舒兆发<sup>[13]</sup>、代伟明等<sup>[14]</sup>分别完成了配栓钉混凝土板的静力和抗震试验,结果表明,配置栓钉有利于改善试件的受力性能,但栓钉的试验参数相对有限,另外,中国规范对栓钉设计尚未给出具体针对性条文。按照设计规范的指导思想,当有可靠依据时,可采用栓钉作为抗冲切钢筋。为了给抗冲切栓钉在实际工程中的应用提供依据,对7个配栓钉的钢筋混凝土双向板柱节点进行多参数试验研究,分析各参数对板柱节点的冲切性能的影响,进而结合有关规范对试验结果进行评估,验证试验结果的可靠性。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试件与加载柱尺寸分别为  $2\ 550\ \text{mm} \times 2\ 550\ \text{mm} \times 180\ \text{mm}$  和  $250\ \text{mm} \times 250\ \text{mm} \times 300\ \text{mm}$ ,试件编号为 SDB1~SDB7(即 SDB 系列),栓钉由栓柱、栓帽和栓底板带组成,栓柱按照设计间距焊接在底板上,对成组布置的栓柱起定位作用,试件配筋及栓钉构造见图 1(a)~(c),栓钉布置形式为:正交布置 1、正交布置 2 和放射布置,详见图 1(d)~(f)。



注:  $d$ 和 $h$ 分别为栓钉直径和栓钉高度,单位为mm。

图1 试件构造

Fig. 1 Construction of specimen

表 1 给出了试件参数,板柱节点采用整体浇筑,栓钉预先埋置于混凝土中<sup>[15]</sup>,板下部纵向钢筋采用 HRB400 级,  $f_y=513$  MPa,配筋率为 1.28%。

### 1.2 加载方案

试验在湖南大学结构工程实验室完成,试验装置如图 2 所示。试件放置于刚性反力钢框架上,板体柱头向上,通过试件上方反力横梁将轴心荷载施加在柱头

上,试验采用 1 000 kN 液压千斤顶(KD4050-1000 kN 荷载传感器)加载。试验过程分为 3 个阶段:预加载、分级加载和破坏加载,分级加载过程中出现开裂之前每级荷载增量为 25 kN,试件开裂后改为每级荷载增量为 50 kN,在接近计算破坏荷载的 80%时,每级荷载增量为 10 kN,直至试件破坏。采集每级荷载加载完成后的数据,并观察板底裂缝的开展。

表 1 试件参数  
Table 1 parameters of Specimens

试件编号	$f_{cu}/\text{MPa}$	$f_t/\text{MPa}$	$f_{yv}/\text{MPa}$	栓钉位置 $s_0/s$	栓钉数量(每圈)、直径	栓钉高度 $h/\text{mm}$	布置形式
SDB1	52.27	3.24	335	50/75	8 $\Phi$ 10	140	正交 1
SDB2	48.17	3.40	335	50/75	8 $\Phi$ 10	110	正交 1
SDB3	51.47	3.32	335	50/120	8 $\Phi$ 10	140	正交 1
SDB4	51.29	3.32	405	50/75	8 $\Phi$ 10	140	正交 1
SDB5	51.49	3.32	335	50/75	8 $\Phi$ 14	140	正交 1
SDB6	43.23	3.10	335	50/75	12 $\Phi$ 10	140	正交 2
SDB7	42.77	3.09	335	50/75	8 $\Phi$ 10	140	放射

注:  $f_{cu}$ 为混凝土的抗压强度;  $f_t$ 为混凝土的抗拉强度;  $f_{yv}$ 为箍筋的屈服强度。



图 2 试验加载装置  
Fig. 2 Test setup

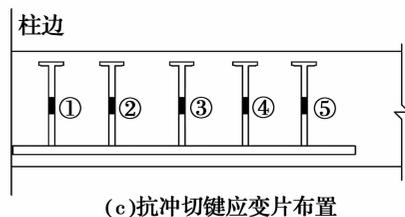
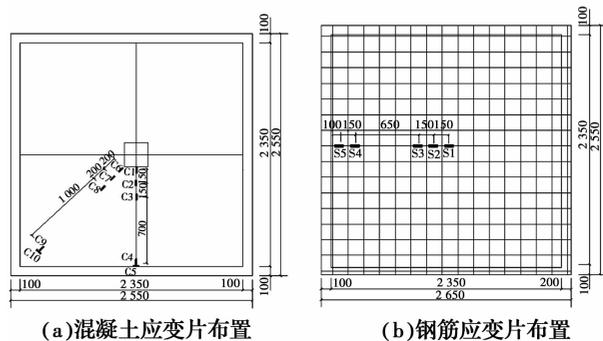


图 3 应变片布置

Fig. 3 Arrangement of strain gauges

### 1.3 测试内容与测点布置

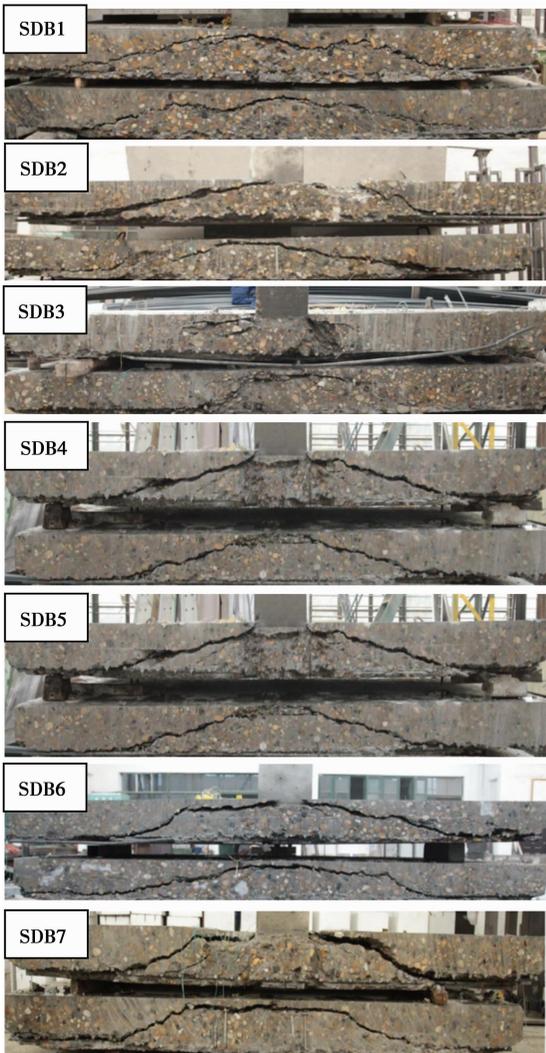
采用浙江黄岩测试仪器厂生产的 BX120-1AA、BX120-2AA 和 BX120-80AA 型应变片测定钢筋和混凝土以及栓钉处的应变,应变片布置见图 3,应变数据通过日本东京测器 TDS-530 静态电阻应变仪采集。挠度采用 LVDT 位移传感器测量。观察裂缝并及时初步绘制和标记加载值,以便后期准确描绘裂缝发展趋势<sup>[16]</sup>。

## 2 试验现象

由于配置栓钉的钢筋混凝土双向板在竖向荷载作用下裂缝开展过程基本一致,限于文章篇幅,不作

逐一赘述。SDB 系列试件在荷载约为 150~200 kN ( $0.16F_u\sim 0.24F_u$ ) 出现初始裂缝,且裂缝主要集中于柱头附近径向和环向,以径向裂缝为主;增大荷载,试件径向裂缝逐渐向板边快速延伸,试件环向裂缝以柱头为中心向板边扩大,当荷载为 450~550 kN ( $0.45F_u\sim 0.65F_u$ ) 时,试件径向裂缝基本延伸至板边;随着荷载的提高,主要以环向裂缝发展为主;当达到破坏荷载时,SDB 系列试件均出现瞬间脆性断裂声,试件发生冲切破坏,但各试件延性表现差异较

大。为了更好地研究试件失效模式,沿柱边将钢筋切断,可以看到完整的失效剖切断面,如图 4 所示。依据剖切断面测算冲切破坏锥体平均倾角,如表 2 所示。除试件 SDB3 平均倾角较大( $33^\circ$ )外,其他试件冲切锥体平均倾角在  $10^\circ\sim 19^\circ$  之间,说明斜裂缝均不同程度地穿过栓钉,有利于改善试件的抗冲切性能;冲切锥体平均倾角较小的试件(如试件 SDB1、试件 SDB4 和试件 SDB5),板边均出现不同程度的钢筋与混凝土的撕裂破坏,钢筋与混凝土之间产生较大的滑移,从而使试件的破坏增加额外的延性,降低了破坏脆性程度;对于试件 SDB3,由于增大栓钉间距,削弱了栓钉性能充分发挥,试件破坏严重,说明限制栓钉间距对于改善板柱节点破坏形态、提高承载能力很有必要。图 5 给出了典型板平面裂缝图,从图 5 可清晰看出裂缝发展的全过程及冲切锥体外轮廓线。



注:照片为距柱边30 mm处剖切图。

图 4 SDB 系列试件剖切图

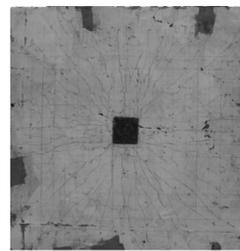
Fig. 4 Cuttings figure of SDB series specimens

表 2 试验结果

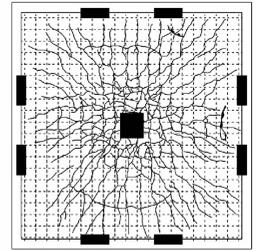
Table 2 Experimental results

试件编号	$f/\text{mm}$	$F_{cr}/\text{kN}$	$F_u/\text{kN}$	平均倾角 $\alpha/(\text{^\circ})$
SDB1	32.06	200	891	10
SDB2	27.19	150	839	18
SDB3	23.1	200	820	33
SDB4	32.11	200	903	12
SDB5	43.75	175	946	11
SDB6	32.18	150	907	17
SDB7	32.12	150	905	19

注: $f$ 为极限荷载对应的跨中挠度; $F_{cr}$ 为开裂荷载; $F_u$ 为极限荷载。



破坏形态照片



破坏形态描绘图

图 5 典型板(试件 SDB6)平面裂缝图

Fig. 5 Typical slab (specimen SDB6) plane fracture diagram

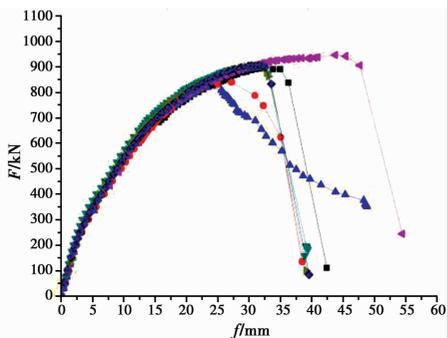
### 3 试验结果分析

#### 3.1 承载力及变形性能分析

图 6 为荷载-挠度曲线,由图 6 可知,所有试件均发生冲切破坏。在钢筋初始屈服前,曲线斜率与试件开裂刚度、弯曲刚度及钢筋材料性能有较大关系,因此,各曲线总体趋势基本一致,但由于栓钉参数的不同,抑制斜裂缝的形成和开展的效果差异较大,试件峰值荷载及变形能力有所区别。冲切破坏时试件 SDB5 的承载力和变形较其他试件明显提高,试件 SDB2 的抗冲切性能相对较弱。结合表 2,以试件 SDB1 作为参考试件,其他试件通过调整栓钉参数和布置进行多参数对比,结果表明:试件 SDB2 栓钉高度由 140 mm 降低至 110 mm,其承载能力由试件 SDB1 的 891 kN 降低至 839 kN,降低幅度约为 6%,挠度由 32.06 mm 减少至 27.19 mm,减少幅度约为 15%,说明降低栓钉高度对试件的承载能力和变形能力均产生负面影响,不利于斜裂缝穿过栓钉发挥作用;试件 SDB3 与试件 SDB1 主要区别在于栓钉间距由 75 mm 增加到 120 mm,其承载能力降低至 820 kN,降低幅度约为 8%,挠度减少至 23.1 mm,降低幅度约为 28%,可见增大栓钉间距对

试件承载能力和变形均有削弱,且试件变形能力降低更为显著;试件 SDB4 主要提高栓钉强度,屈服强度由 335 MPa 提高至 405 MPa,试件承载能力提高至 903 kN,挠度增大至 32.11 mm,表明提高栓钉强度改善试件板的承载能力和延性均有益,但改善程度并不明显,这可能与栓钉强度提高幅度不大有关,而在实际工程中,通过提高栓钉的强度来提高板的抗冲切承载力并不是有效经济的方法;试件 SDB5 将栓钉直径由 10 mm 增加至 14 mm,结果表明,试件 SDB5 极限荷载为 946 kN,较试件 SDB1 增加幅度约为 6%,极限挠度对应为 43.75 mm,提高幅度约为 36%,可见,通过增大栓钉栓径来改善试件性能是可行的;试件 SDB6 和试件 SDB7 采用与试件 SDB1 不同的栓钉布置方式,试验结果表明,试件极限承载能力和变形均有所提高,但提高幅度有限。

分析结果表明,栓钉参数的合理性选择是影响试件抗冲切性能的重要因素。通过栓钉有效抑制板柱节点斜裂缝的形成和发展,使斜裂缝穿过栓钉,栓钉参与抵抗冲切荷载,能提高板柱结构的承载力和变形能力。



注: — SDB1 — SDB2 — SDB3 — SDB4 — SDB5 — SDB6 — SDB7

图 6 荷载-挠度曲线

Fig. 6 Load-displacement curves

### 3.2 混凝土和纵筋应变

图 7 为典型试件混凝土应变-荷载关系曲线。由图 7 可知,加载初期,板受压面混凝土应变变化不大,当板下表面受拉开裂后,受压区混凝土应变增长速度加快,各试件测点处应变总体趋势基本一致,混凝土应变测点靠近柱头附近数值较大,远离柱头数值逐渐减小,且呈递减趋势,当达到约为极限荷载 80% 时,板受压混凝土应变出现迅速回缩,说明试件环向冲切斜裂缝基本形成,受压面混凝土出现应力重分布现象,破坏时能量释放导致板面有局部回弹趋势;特别注意,当临界破坏荷载时,试件边缘径向测点 C4 和 C9 处板面有径向拉力存在,且维持较低的应变水平,说明该测点对冲切荷载并不敏感,受板

面发生的转动变形影响较大。板环向测点 C5 和 C10 的数据保持递增趋势,说明此处存在持续增大的压应力,且应力较集中,主要由支座反力持续增加造成;表 3 中 C1 和 C6 为柱头附近混凝土径向测点, C5 和 C10 为板边缘处混凝土环向测点。通过数据对比可以发现,柱头附近受压面混凝土应变总体处于较低的状态,说明破坏时柱头沉陷对板面的混凝土的径向影响有限,而板边环向测点由于受支座反力影响,其值相对较大。

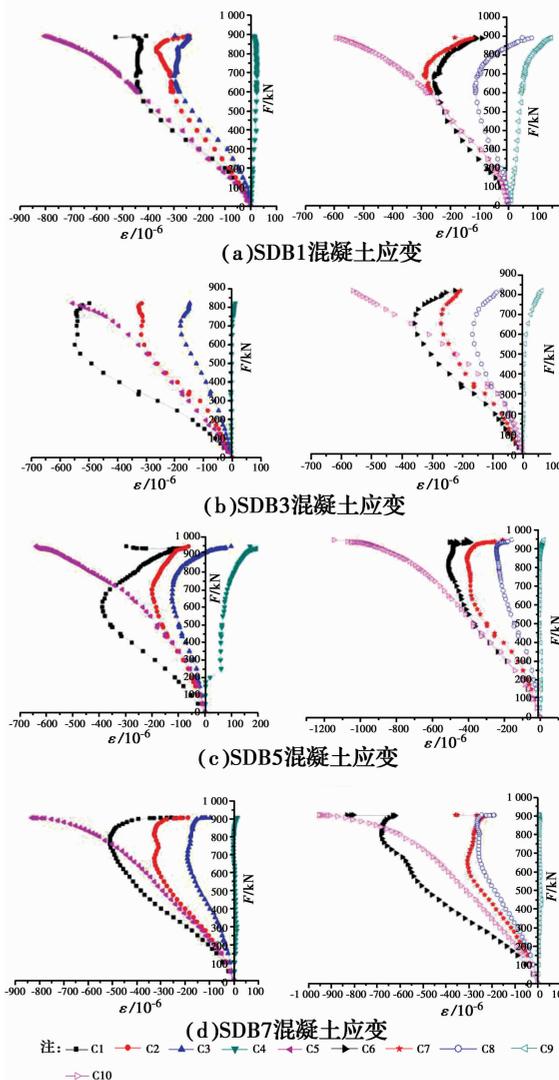


图 7 混凝土的应变-荷载曲线

Fig. 7 Strain-Load curves of concrete

图 8 为典型试件钢筋应变-荷载关系曲线。配栓钉的板柱节点中,钢筋应变初期发展较为缓慢,随着荷载不断提高,板开裂后钢筋应变增速加快,板柱交界处测点 S1~S3 提高较为明显,而板边测点 S4 和 S5 应变增量并不明显,说明远离柱头测点受竖向加载的影响较小,受支座集中反力影响较大,部分测点出现受压应变;当荷载达到极限值 80% 左右,部

分试件纵向钢筋达到屈服,且钢筋屈服范围与板的承载力和延性有关,从图4可以看出,试件SDB3冲切锥体半径最小,冲切承载力较低且延性表现较差,钢筋屈服范围较小,而试件SDB6的承载力和变形能力优于其他试件,其钢筋屈服范围较其他试件要大,有利于降低破坏时的脆性程度;表3反映了沿径向钢筋测点的应变状态,对比表中数据,表明钢筋已经达到或接近受拉屈服,屈服位置主要在板柱交界处附近;临近板边钢筋受力应变逐渐减小,部分测点受支座反力影响出现受压应变。

表3 试件冲切破坏时典型测点应变值

Table 3 Strain values of specimens' typical measuring points when punching shear failure

试件 编号	$F_u$ / kN	$C_1$ / $10^{-6}$	$C_5$ / $10^{-6}$	$C_6$ / $10^{-6}$	$C_{10}$ / $10^{-6}$	$S_1$ / $10^{-6}$	$S_5$ / $10^{-6}$
SDB1	891	-406	-803	-114	-594	2 576	-229
SDB2	839	-694	-538	-692	-665	1 034	-166
SDB3	820	-498	-556	-225	-563	2 424	25
SDB4	903	-294	-793	-296	-717	1 376	-10
SDB5	946	-297	-638	-409	-1 147	2 338	560
SDB6	907	-283	-912	-538	-1 001	2 191	24
SDB7	905	-258	-831	-803	-955	5 310	132

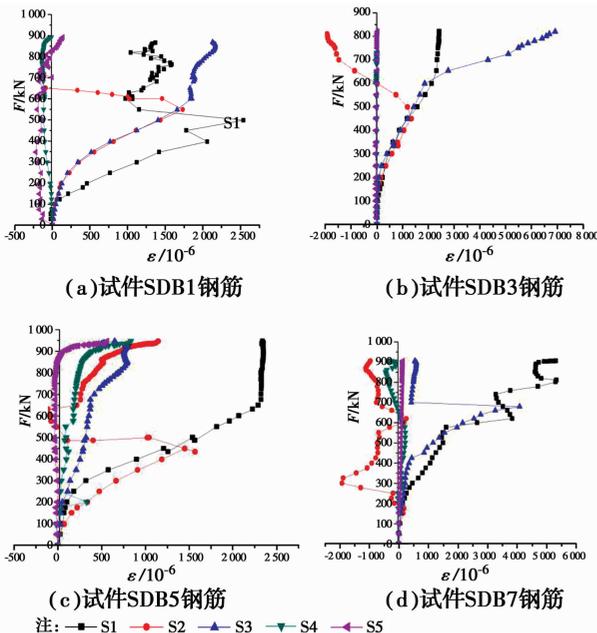


图8 钢筋的应变-荷载曲线

Fig. 8 Strain-Load curves of reinforcement

### 3.3 栓钉应变

为了测出各试件栓钉的受力性能,按距柱头由近至远布置了编号为1~5的应变测点,如图3(c)所示,并同时布置相应的校核测点,以防部分测点结果

失效,实际布置见图9。

测点的应变-荷载曲线如图10所示,栓钉的最大应力及位置见表4。从图10和表4可以看出,7个试件中,随着荷载的增加,栓钉均发挥了抵抗承载力的作用,荷载在300 kN前,栓钉应变发展均不明显,最大值约在 $200\mu\epsilon$ ;随着荷载增大,各试件栓钉应变变化存在较大差异:以试件SDB1作为参考,试件SDB2由于栓钉高度降低,导致柱头附近裂缝平行于板上表面,绕过前4排栓钉后与第5排栓钉相交,故第5排栓钉性能发挥较充分;试件SDB3由于加大栓钉间距,斜裂缝与第1排栓钉发生相交,故应变增量显著,其他排栓钉处于较低的应变水平,材料性能没有充分发挥;试件SDB1和试件SDB4的主要区别在栓钉强度,其他参数基本一致,因此,栓钉应变发展趋势相差不大,距柱头较近的第1~3排栓钉应变增大显著,峰值应变位置均在距柱头50 mm(即第1排)处,且尚未达到屈服;试件SDB5中栓钉应变峰值位置出现在距柱头200 mm(即第3排)处,且峰值应力达到 $1\ 972\mu\epsilon$ (即394.4 MPa),栓钉达到屈服,说明增大栓钉直径有利于材料强度的充分发挥;与试件SDB1相比,试件SDB6由于增加每圈栓钉数量,提高柱头附近混凝土的整体性,栓钉应变均有所提高,但发展趋势基本一致;试件SDB7由于采用栓钉放射布置,其应变分布更为均匀,有利于材料性能的整体发挥。综上分析可知,试件的冲切破坏模式对栓钉抗冲切性能的影响较大。



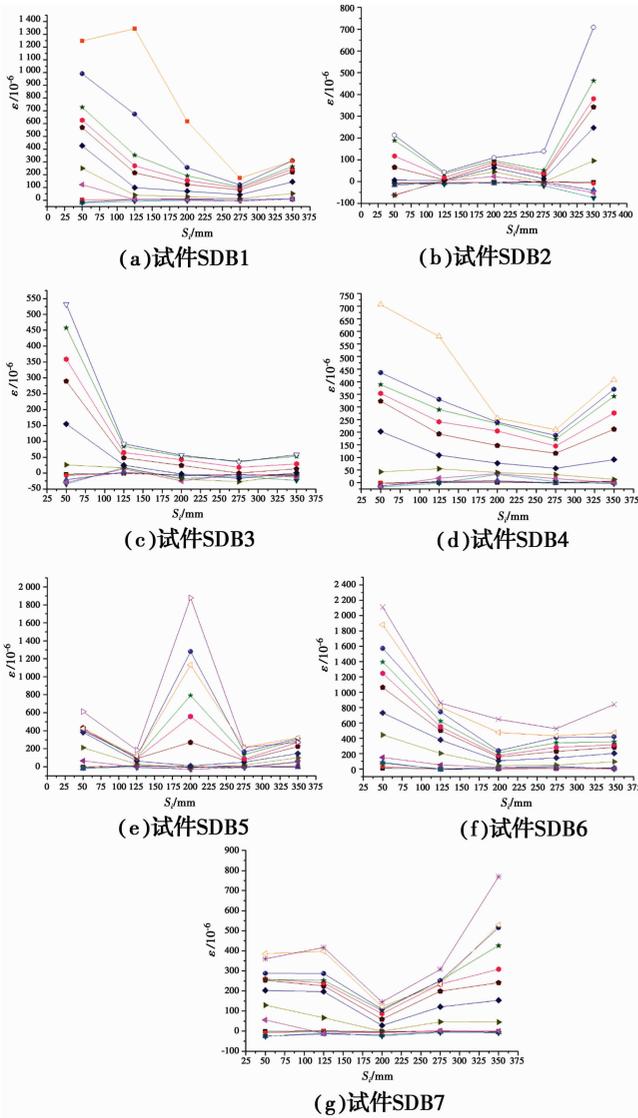
图9 栓钉测点布置

Fig. 9 Measuring points of studs

表4 栓钉最大应力及位置

Table 4 Maximum stress and position of studs

试件编号	$\sigma_{\max}$ /MPa	距柱面距离/mm
SDB1	282	125
SDB2	148.5	350
SDB3	111.7	50
SDB4	148.5	50
SDB5	394.4	200
SDB6	443.1	50
SDB7	161.7	350



注:  $S_i$  为第  $i$  个栓钉测点距柱面距离

- 50 kN — 100 kN — 200 kN — 300 kN — 400 kN — 500 kN — 600 kN
- 700 kN — 750 kN — 800 kN — 820 kN — 839 kN — 850 kN — 892 kN
- 900 kN — 903 kN — 906 kN — 907 kN — 947 kN

图 10 测点应变-荷载曲线

Fig. 10 Strain-Load curves of measuring points

### 4 规范验证

表 5 给出了规范计算值与实测值的比较,从表中不难看出,各国规范计算具有一定的离散性,这与不同规范在制订时考虑的因素差异有关。中国规范<sup>[6]</sup>及美国规范 ACI<sup>[5]</sup>公式中未考虑配筋率  $\rho$  对抗冲切承载力影响,而欧洲规范 MC2010<sup>[17]</sup>和英国 BS8110<sup>[18]</sup>均予以考虑。为弥补考虑参数影响不充分,中国规范公式对这一问题的处理方法是,计算公式取试验结果的偏下限,以得到在同样荷载分项系数和材料强度分项系数条件下冲切破坏失效概率小于弯曲破坏失效概率的结果。美国规范的抗冲切计算公式过

于保守,这已在很多文献<sup>[19-23]</sup>中有过讨论。分析美英及欧洲规范中抗冲切强度计算公式的可靠度可知,在这些规范中普遍采用较高的可靠指标。由表 5 可知,除试件 SDB5 外,试验值均大于规范计算值,从均值上看,中国规范 GB 50010—2010 和欧洲规范 EN 1992-1-1:2007 更接近试验值,分别为 1.19 和 1.12,而美国规范 ACI318-14 相对偏于安全,从变异系数看,英国规范 BS8110 为 0.06,说明该规范计算较为稳定。总体来说,根据规范计算配栓钉的钢筋混凝土板抗冲切承载力,安全储备足够,但对于反映试验结果的实质不够充分,特别是栓钉对板的抗冲切承载力的贡献有所低估。

表 5 计算值与实测值比较

Tabl 5 Comparing calculated values and measured values

试件 编号	节点破坏试 验值 $F_u/kN$	与规范计算对比 $F_u/F_{cal}$			
		GB 50010— 2010	ACI 318-14	EN 1999 -1-1:2007	BS 8110
SDB1	891	1.19	1.49	1.09	1.25
SDB2	839	1.23	1.61	1.17	1.46
SDB3	820	1.46	1.46	1.51	1.22
SDB4	903	1.17	1.61	1.18	1.35
SDB5	946	0.92	1.07	0.79	1.24
SDB6	907	1.32	1.67	1.21	1.42
SDB7	905	1.07	1.27	0.93	1.32
均值		1.19	1.43	1.12	1.30
变异系数		0.16	0.16	0.22	0.06

### 5 结论

通过在柱头施加荷载来模拟配栓钉双向板柱节点受力性能,对中柱节点进行冲切破坏试验研究,并将其试验结果与相关规范进行了对比,得到以下结论:

1) 提高栓钉强度和增大栓钉直径均有利于改善试件的抗冲切性能。在实际工程中,要满足冲切破坏时栓钉达到屈服较为困难,因此,通过提高栓钉强度来增大试件承载力效果相对有限;对配置增大栓钉直径的试件,其挠度提高幅度达 36%,同时,抗冲切栓钉达到屈服,改善效果尤为明显。

2) 加大栓钉间距和减小栓钉高度均不利于试件的抗冲切性能,其栓钉峰值应变分别出现在距柱面第 1 排和第 5 排,其他排栓钉破坏过程中处于低应变水平,说明栓钉材料性能尚未充分发挥。

3) 对比 3 种不同栓钉布置形式发现,采用相同数量栓钉放射布置和增加每圈栓钉数量的正交布置,均有利于提高试件抗冲切能力,但两种布置方式对试件抗冲切性能改善有限。

4) 采用规范计算配栓钉的钢筋混凝土板抗冲切承载力安全储备足够,但对于反映试验结果的实质

不够充分,特别是栓钉对板的抗冲切承载力的贡献有所低估。

#### 参考文献:

- [1] CARVALHO A L, MELO G S. Punching shear in post-tensioned flat slabs with stud rail shear reinforcement [J]. *ACI Structural Journal*, 2011, 108(5):523-531.
- [2] LIPS S, RUIZ F M, MUTTONI A. Experimental investigation on punching strength and deformation capacity of shear-reinforced slabs [J]. *ACI Structural Journal*, 2012, 109(6):889-900.
- [3] BRANTSCHEN F, FARIA D M V, FERNANDEZ RUIZ M, et al. Bond behaviour of straight, hooked, U-shaped and headed bars in cracked concrete [J]. *Structural Concrete*, 2016, 17(5): 799-810.
- [4] RICKER M, HAUSLER F, RANDL N. Punching strength of flat plates reinforced with UHPC and double-headed studs [J]. *Engineering Structures*, 2017, 136: 345-354.
- [5] ACI Committee 318. Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318-14 [S]. American Concrete Institute, 2014.
- [6] 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.  
Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [7] YAMAD T, NANNI A, ENDO K. Punching shear resistance of flat slabs: influence of reinforcement type and ratio [J]. *ACI Structural Journal*, 1992, 88(4): 555-564
- [8] GHALI A. An efficient solution to punching of slabs [J]. *Concrete International*, 1989, 102(2): 50-54.
- [9] GHALI A, YOUAKIM S A. Headed studs in concrete: State of the art [J]. *ACI Structural Journal*, 2005, 102(5): 657-667.
- [10] ELGABRY A A, GHALI A. Design of stud-shear reinforcement for slabs [J]. *ACI Structural Journal*, 1990, 87(3):350-361
- [11] GUAN H, LOO Y C. Failure analysis of column-slab connections with stud shear reinforcement [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2003, 30(5): 934-944.
- [12] GHALI A, YOUAKIM S A. Headed studs in concrete: State of the art [J]. *ACI Structural Journal*, 2005, 102(5): 657-667
- [13] 舒兆发. 配置受冲切锚栓的混凝土板柱连接的试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 1999, 20(1): 50-58.  
SHU Z F. Experimental investigation on concrete slab-column connections with stud shear reinforcement [J]. *Journal of Building Structures*, 1999, 20(1): 50-58. (in Chinese)
- [14] 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 W M, ZHANG Y, QIAN J R, 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. (in Chinese)
- [15] 金玉, 易伟建, 胡岚, 等. 配置抗剪栓钉的钢筋混凝土单向板柱节点受剪性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(8): 66-72.  
JIN Y, YI W J, HU L, et al. Experimental study on shear performance of reinforced concrete one-way slab-column connection with shear studs [J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(8): 66-72. (in Chinese)
- [16] 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 Y, YI W J, HU L, 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. (in Chinese)
- [17] Model code for concrete structures: CEB-FIP, 2010 [S]. Comite' Euro-International de Beton/Federation International de la Precontrainte, Lausanne, Switzerland, 2010.
- [18] Structural use of concrete, Part I : Code of practice for design and construction: BS 8110, 1997 [S]. British Standards Institution, London, 1997: 151-167.
- [19] LEE J H, YOON Y S, LEE S H, et al. Enhancing performance of slab-column connections [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(3): 448-457.
- [20] GUAN H, LOO Y C. Failure analysis of column-slab connections with stud shear reinforcement [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2003, 30(5): 934-944.
- [21] PARK H G, CHOI K K, CHUNG L. Strain-based strength model for direct punching shear of interior slab - column connections [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(3): 1062-1073.
- [22] HAWILEH R, NASER M, MALHAS F. Finite element modeling of punching shear in two-way slabs reinforced with high-strength steel [C]//Structures Congress 2013, May 2-4, 2013, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2013.
- [23] ZOHREVAND P, YANG X, JIAO X, et al. Punching shear enhancement of flat slabs with partial use of ultrahigh-performance concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(9): 04014255.