

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 抗冲切钢筋对板柱中节点抗震性能的影响

唐明<sup>1</sup>, 易伟建<sup>1</sup>, 吴越凡<sup>1</sup>, 刘力维<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**为研究抗冲切钢筋和暗梁对板柱节点抗震性能的影响,进行了 5 个低周往复荷载作用下的板柱节点试验,其中,1 个试件无抗冲切钢筋,另外 4 个试件分别配置螺旋箍筋、四肢箍筋、八肢箍筋和栓钉。对各试件的裂缝发展特征、破坏形态、滞回性能、不平衡弯矩承载力和延性性能等进行了分析。试验结果表明:配置抗冲切钢筋试件的不平衡弯矩承载力和延性性能较无抗冲切钢筋试件分别提高 13%~48% 和 68%~198%;合理设计暗梁能明显提高试件的整体抗震性能,配置四肢箍筋的试件能满足中国规范的抗震性能需求,且较采用八肢箍筋的试件更经济。总结和分析已有试验数据发现,中国规范对于配置抗冲切钢筋板柱节点的计算结果与试验结果整体较吻合,但离散度偏高。

**关键词:**板柱节点;抗震性能;冲切破坏;栓钉;箍筋

**中图分类号:**TU375.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)03-0054-10

## Effect of shear reinforcement on seismic performance of interior slab-column connections

Tang Ming<sup>1</sup>, Yi Weijian<sup>1</sup>, Wu Yuefan<sup>1</sup>, Liu Liwei<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, P. R. China)

**Abstract:** To study the effect of shear reinforcement and installation of concealed beam on seismic behavior of slab-column connections, five slab-column connections were tested under low-cycle reversed load. The control specimen had no shear reinforcement, while the other four specimens were equipped with spiral stirrups, four-leg stirrups, eight-leg stirrups and studs, respectively. Crack development characteristics, failure modes, hysteretic behaviour, unbalanced moment capacity and ductility of each specimen were analyzed. The results show that compared with the specimen without shear reinforcement, unbalanced moment capacity and ductility of specimens with shear reinforcement are increased by 13%~48% and 68%~198%, respectively. The general seismic performance of specimens is significantly improved by properly designing the concealed beam. The specimen with four-leg stirrups can meet the requirement of seismic performance in Chinese code and is more economical than the that with eight-leg stirrups. By summarizing and analyzing existing test data, it is found that for slab-column connections with shear

**收稿日期:**2019-06-17

**基金项目:**国家自然科学基金(51338004, 51178175)

**作者简介:**唐明(1987-),男,博士生,主要从事结构抗震研究, E-mail: tangming0512@163.com。

**Received:**2019-06-17

**Foundation items:**National Natural Science Foundation of China (51338004, 51178175)

**Author brief:**Tang Ming(1987-), PhD candidate, main research interest: structural seismic, E-mail: tangming0512@163.com.

reinforcement, the calculated results with Chinese code are in good agreement with test results, but the dispersion of calculated results is relatively high.

**Keywords:** slab-column connection; seismic performance; punching failure; studs; stirrups

钢筋混凝土平板结构体系具有施工方便、降低结构层高和传力路径直接等优点。然而,对处于中震地区的平板结构,其在使用过程中可能产生较大的内力和变形,因此,抗冲切钢筋常被运用于板柱节点的设计,以提高其承载能力和变形能力等抗震性能。目前,开展试验研究采用的抗冲切钢筋类型主要有两类:箍筋<sup>[1-6]</sup>和栓钉<sup>[4-15]</sup>。学者们研究了抗冲切钢筋的直径、间距、数量、布置方式和类型等因素对板柱节点抗震性能的影响。Hawkins等<sup>[1]</sup>完成了5个板柱节点试验,结果表明,合理设计箍筋能有效提高节点的延性、耗能能力和残余承载力,避免节点发生脆性破坏。Robertson等<sup>[5]</sup>研究了箍筋和栓钉对板柱节点抗震性能的影响,结果表明,在低竖向荷载作用下,配置栓钉和箍筋对预防节点发生冲切破坏具有同等效果,而栓钉施工更加简便。Song等<sup>[6]</sup>的研究结果表明,配置箍筋、栓钉和抗剪带能明显提高节点的不平衡弯矩承载力和耗能能力,使节点发生延性较好的弯曲破坏。Islam等也得到相似的试验结果<sup>[2-4,7-15]</sup>。目前对高竖向荷载作用下的板柱节点的试验研究较少,且主要以抗冲切栓钉为研究对象<sup>[8,10,13-15]</sup>,缺乏对不同类型的抗冲切钢筋进行直接比较的试验研究,影响了板柱结构在中震区的广泛应用。笔者设计完成了5个板柱中节点试验,研究高竖向荷载作用下抗冲切钢筋类型以及暗梁对板柱节点抗震性能的影响,基于已有试验数据,探讨了中国规范附录F参考设计方法<sup>[16]</sup>的合理性,为板柱结构的工程应用提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

板柱结构原型的柱网尺寸为7.5 m×7.5 m,柱截面尺寸为350 mm×350 mm,层高三层,板厚为230 mm,楼面恒载为7.0 kN/m<sup>2</sup>,活载为4.0 kN/m<sup>2</sup>,如图1所示。研究对象为中柱节点,试件缩尺比例为2/3,板和柱按反弯点位置取出,方法与文献<sup>[14]</sup>相同。试验共设计了5个方形板柱中节点,其中,1个试件未配置抗冲切钢筋,其余试件配置箍筋或栓钉。板截面尺寸为2 900 mm×2 900 mm×150 mm,有效厚度为123 mm,有效跨度为2 520 mm,

方形柱截面尺寸为350 mm,柱子有效高度为2 000 mm,板和柱的混凝土保护层厚度均为15 mm,如图2所示。

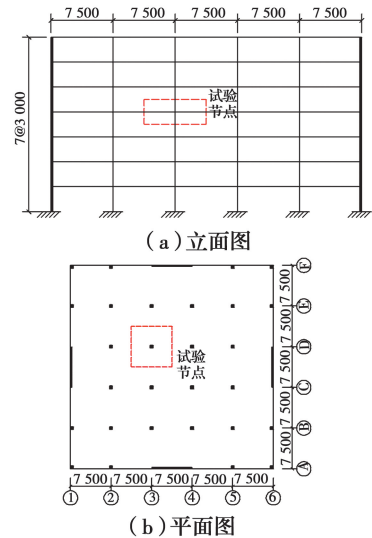


图1 原型建筑(单位:mm)

Fig. 1 Prototype building(unit: mm)

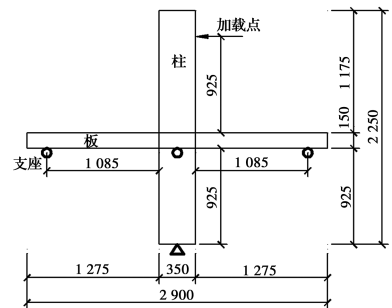


图2 试件几何尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Dimension of specimens (unit: mm)

图3为板受弯钢筋布置图和柱子配筋图。在 $b_c + 3h$ ( $b_c$ 为垂直于往复荷载方向的柱边长, $h$ 为板厚)板宽范围内,无抗冲切钢筋试件RC1的配筋率为0.81%,其他试件的配筋率为0.73%,以考察配置抗冲切钢筋后,节省少量纵筋能否有效提高板柱节点的抗震性能。主要变量为抗冲切钢筋类型、暗梁的宽度和箍筋肢数。试件ST2、ST3和SR5采用的抗冲切钢筋分别为螺旋箍筋、四肢箍筋和栓钉,三者的抗冲切钢筋承载力较接近,与试件RC1为对照组。配置四肢箍筋的试件ST3(暗梁宽度为柱宽加上1倍有效板厚),配置八肢箍筋的试件ST4(暗梁

宽度为柱宽加上 2.7 倍有效板厚),两者与试件 RC1 为对比组。3 类箍筋的加密区间距均为 60 mm,非加密区均为 110 mm。箍筋布置依据混凝土结构设计规范<sup>[16]</sup>和建筑抗震设计规范<sup>[17]</sup>中暗梁构造要求,而栓钉布置符合无粘结预应力混凝土结构技术规程<sup>[18]</sup>的规定。试件详细设计参数见表 1,抗冲切钢筋布置见图 4。

各试件在浇筑时,预留 3 个尺寸为 150 mm 的立方体试块,与试件在同等条件下养护,28 d 龄期后,通过压力试验机测得混凝土立方体平均抗压强度  $f_{cu}$ ,然后依据规范<sup>[16]</sup>公式换算得到混凝土轴心抗压强度标准值  $f_{ck}$ 和混凝土轴心抗拉强度标准值  $f_{tk}$ ,如表 1 所示。板受弯钢筋强度等级为 HRB400,直径为 12 mm;箍筋强度等级为 HPB300,螺旋箍筋直径为 6 mm,四肢箍筋和八肢箍筋直径均为 8 mm;栓钉直径为 10 mm,上述钢材各取 3 个同批次试样,实测屈服强度和抗拉强度的平均值见表 1。

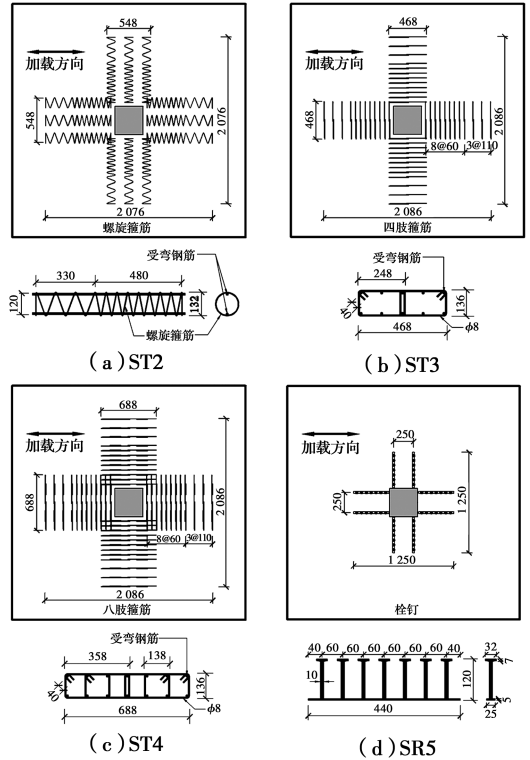


图 4 抗冲切钢筋布置图(单位:mm)

Fig. 4 Arrangement of Shear reinforcement(unit: mm)

1.2 加载与测量方案

加载装置见图 5。板四边与八根竖向刚性杆铰接,两相邻刚性杆中心间距为 1 260 mm,柱子上端和下端分别与水平作动器和刚性杆铰接。试验时,100 t 液压千斤顶置于柱底端,向上加载至预定值并保持恒定。然后采用位移控制模式在上柱施加水平往复荷载,加载曲线以 Park 等<sup>[4]</sup>、Song 等<sup>[6]</sup>和 Kang 等<sup>[11]</sup>完成的系列试验为设计参考,每级位移进行两次循环,按层间位移角增量 0.25% 控制。试验过程中,详细记录了板顶裂缝开展情况;测量了柱底竖向荷载、柱上端水平荷载和水平位移,见图 5;采集了受弯钢筋和抗冲切钢筋应变,见图 6。

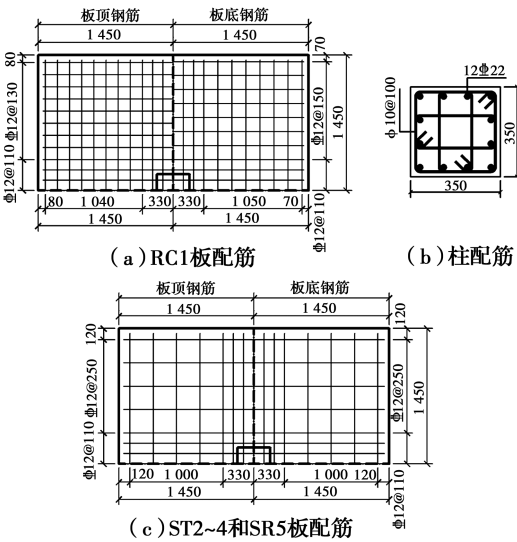


图 3 试件配筋(单位:mm)

Fig. 3 Reinforcement of specimens (unit: mm)

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件	抗冲切钢筋类型	$f_{cu}/$ MPa	$f_{ck}/$ MPa	$f_{tk}/$ MPa	$f_y/$ MPa	$f_{yu}/$ MPa	$f_{yv}/$ MPa	$f_{yvu}/$ MPa	$\rho_t/\%$	$\rho_b/\%$	$V_c/\text{kN}$	$V_s/\text{kN}$	$V_{cs}/\text{kN}$	$V_g/\text{kN}$	$V_g/V_c$
RC1		39.4	29.9	2.98	421	580			0.81	0.81	485.3		485.3	315.5	0.65
ST2	螺旋箍筋	42.0	31.7	3.07	421	580	334	474	0.73	0.73	499.4	396.3	666.7	326.8	0.65
ST3	四肢箍筋	42.4	32.0	3.08	421	580	305	460	0.73	0.73	501.4	502.6	753.1	328.5	0.66
ST4	八肢箍筋	38.0	28.9	2.92	421	580	305	460	0.73	0.73	475.8	753.9	936.2	309.3	0.65
SR5	栓钉	35.0	26.6	2.79	421	580	326	498	0.73	0.73	454.7	419.7	654.1	295.6	0.65

注:  $f_y$  和  $f_{yu}$  分别为受弯钢筋的屈服强度和抗拉强度;  $f_{yv}$  和  $f_{yvu}$  分别为抗冲切钢筋的屈服强度和抗拉强度;  $\rho_t$  为  $b_c+3h$  板宽范围内的板顶配筋率;  $\rho_b$  为  $b_c+3h$  板宽范围内的板底配筋率,  $b_c$  为柱边长,  $h$  为板厚;  $V_c$  和  $V_s$  分别为根据规范<sup>[16]</sup>得到的混凝土抗冲切承载力和抗冲切钢筋承载力;  $V_{cs}=0.7V_c+0.8V_s$ , 为考虑承载力折减的节点总的抗冲切承载力;  $V_g$  为楼板重力荷载在临界截面上产生的冲切反力, 等于试验中的千斤顶施加力减去试件自重;  $V_g/V_c$  为计算重剪比。

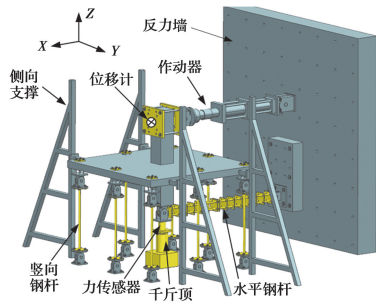
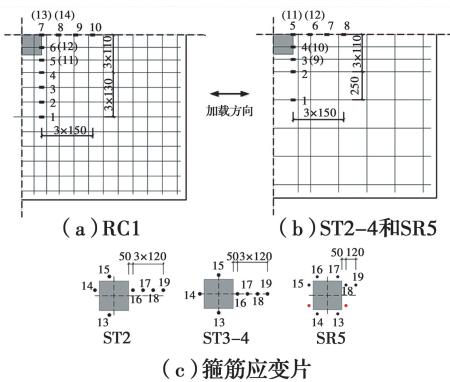


图 5 试验加载装置

Fig. 5 Test setup



(c) 箍筋应变片

注: 括号内数字为板底钢筋应变片编号; 红色圆圈表示应变片损坏

图 6 钢筋应变片布置

Fig. 6 Arrangement of steel strain gauges

## 2 试验结果

### 2.1 试验现象与破坏形态

各试件仅在竖向荷载作用时与破坏时的裂缝分布及破坏形态如图 7 所示。整个试验过程中,各试件的柱子均未出现肉眼可见裂缝,最终破坏发生于板柱交接处。仅施加竖向荷载的过程中,各试件裂缝最初产生于板柱交接处,之后发展成向板角部延伸的辐射状裂缝以及少量柱周的环向裂缝;此时裂缝宽度较小,试件 ST4 的裂缝数量相对较少,其余 4 个试件的裂缝分布基本一致。施加往复水平荷载过程中,产生少量新的辐射状裂缝,原有辐射状裂缝上出现短小的分支裂缝,环向裂缝数量逐渐增加;随着施加的水平位移不断增大,不规则的环向裂缝开始连通,将柱周板顶混凝土分成网格状;之后,裂缝的数量和长度变化较小,但原有裂缝宽度明显增大。

试件破坏时伴有“砰”的响声,柱周板顶混凝土明显隆起,出现不规则的环状破坏面。除试件 RC1 外,其余试件的柱周板顶混凝土受压区均有不同程度压坏。试件 RC1 发生整体冲切破坏,冲切破坏面

积最大;试件 ST2 也有冲切破坏的特征,但变形能力比试件 RC1 有明显提高;试件 ST3 和 SR5 破坏特征相近,在板顶纵筋大范围屈服(以柱子为中心的钢筋屈服范围明显大于柱宽加上 5 倍板厚)后,达到较大层间位移角时发生冲切破坏,柱周板顶混凝土保护层与钢筋剥离,局部混凝土被压碎,冲切破坏面积比试件 RC1 明显减小;试件 ST4 在位移角达到 4.5% 时发生弯曲破坏,未产生明显环状冲切主裂缝,在柱边东侧 100 mm 范围内的板顶混凝土被压碎,此时竖向承载能力可以维持,但抗不平衡弯矩能力有较大下降,板顶纵筋屈服范围与试件 ST3 和 SR5 相近。

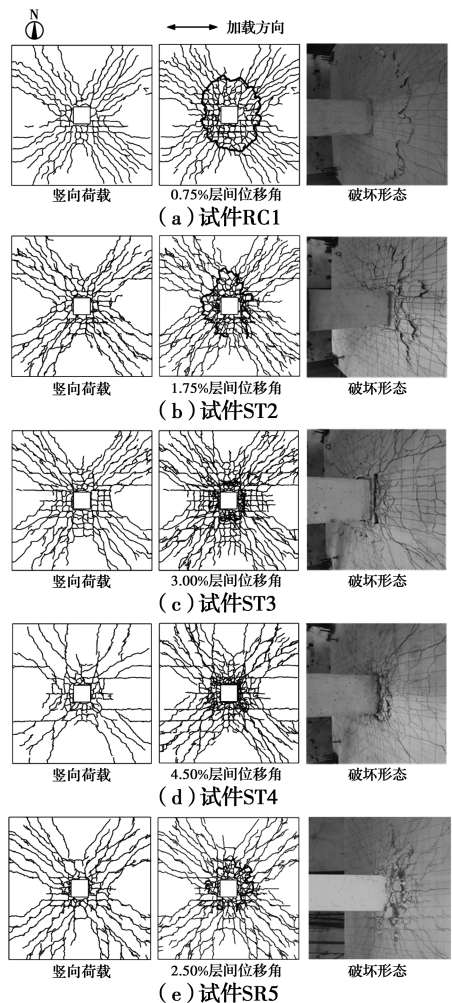


图 7 板顶裂缝分布图

Fig. 7 Crack patterns on slab top surface

### 2.2 滞回性能

图 8 为各试件的不平衡弯矩-层间位移角滞回曲线和骨架曲线,其中,不平衡弯矩由作动器测得水平荷载与柱子有效高度的乘积得到,层间位移角为上柱柱端水平位移与有效柱高的比值。由图 8 可

知,试件 RC1 破坏时卸载残余应变较小,滞回环数量很少且包围的面积较小,耗能能力较差,滞回曲线呈反 S 形,骨架曲线无下降段。其余各试件:1)当层间位移角为 0.5%~0.75%时,各试件滞回环包围的面积和卸载残余变形均较小;2)随着位移角的增大,滞回曲线开始向位移角横轴倾斜,卸载残余变形逐渐增大,同一目标位移角处,第 2 次加载的不平衡弯矩值和滞回环面积均小于第 1 次,此时承载力和刚度退化速度均较慢;3)达到峰值弯矩前,滞回曲线均出现不同程度的捏拢现象;达到峰值弯矩后,试件 ST2 的变形速度明显加快,试件 ST3 在反向加载至 -2.0%位移角时,滞回环向位移角横轴明显偏移,试件 ST4 的滞回曲线基本对称,变形速度比较稳定,试件 SR5 在正向加载至 +2.25%位移角时,滞回环向位移角横轴明显倾斜。整体而言,配置抗冲切钢筋试件的骨架曲线有明显的下降段,由于钢筋滑移和混凝土开裂宽度等因素的影响,滞回曲线呈具有捏缩效应的弓形。

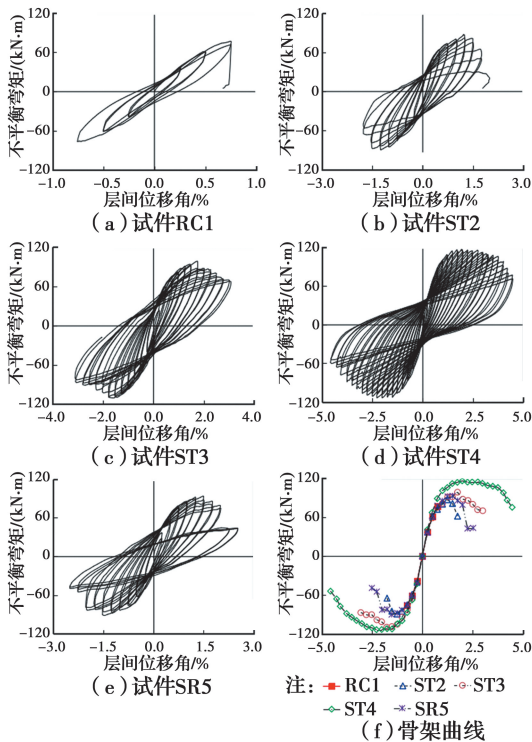


图 8 不平衡弯矩-层间位移角滞回曲线和骨架曲线

Fig. 8 Hysteretic loops and skeleton curves of unbalanced moment versus drift

### 2.3 抗冲切钢筋应变

应变片主要布置于离柱最近一圈抗冲切钢筋上,这是板柱节点最易发生冲切破坏的位置。仅施

加竖向荷载时,各试件板顶穿柱纵筋发生屈服,此时板混凝土和纵筋承担大部分荷载,抗冲切钢筋的应力较低。水平加载初期,混凝土裂缝进一步延伸和加宽,板纵筋屈服范围增大,此时抗冲切钢筋的应力依然不大。继续增大水平荷载,裂缝开始沿板厚方向延伸;当这些斜裂缝与抗冲切钢筋相交后,抗冲切钢筋应力突然且快速增大。随着斜裂缝的延伸和加宽,抗冲切钢筋应力不断增大,继续有抗冲切钢筋应力突增。试验结束时,试件 ST2 的应变片 16、试件 ST3 的应变片 14 和 16、试件 ST4 的应变片 15 和 16、试件 SR5 的应变片 14、16 和 18 发生屈服,应变分布见图 9。

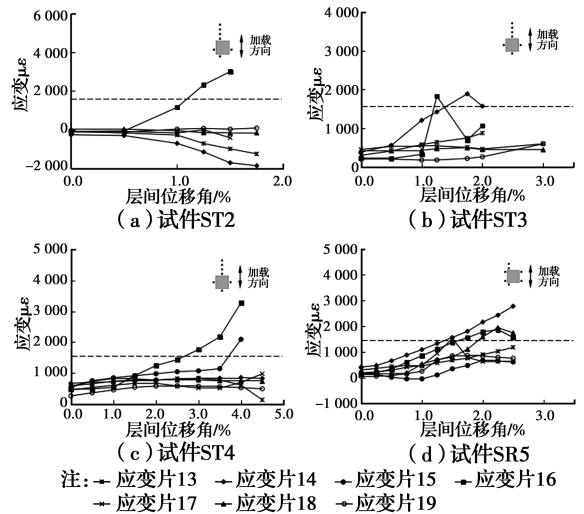


图 9 抗冲切钢筋应变分布图

Fig. 9 Strain distribution of shear reinforcement

试验结果表明:试件破坏时,仅有少量抗冲切钢筋发生屈服,而其余远未达到屈服,抗冲切钢筋没有充分发挥力学性能;与柱表面距离相等的最近一圈抗冲切钢筋的应变有明显差异,反映板内受力不均,这可能是受混凝土开裂位置以及内力重分布的随机性影响。

## 3 试验结果分析

### 3.1 抗冲切钢筋类型的影响

以 RC1 为对照试件,ST2、ST3 和 SR5 分别配置螺旋箍筋、四肢箍筋和栓钉,研究抗冲切钢筋类型对板柱节点抗震性能的影响。对比试件 RC1,其余 3 个试件的破坏模式、主裂缝形态和位置以及混凝土的压碎情况有明显区别,同时承载力、极限层间位移角和延性系数的提高幅度分别为 13%~28%、113%~257%和 68%~105%。试验结果表明,配

置抗冲切钢筋后,即使减少一些纵筋,仍能提高板柱节点的抗不平衡弯矩承载力,且配置抗冲切钢筋的板柱节点延性有明显提高。由图8可知,在试件ST2、ST3和SR5中,配置四肢箍筋的试件ST3变形能力最好,配置栓钉的试件SR5变形能力次之,配置螺旋箍筋的试件ST2变形能力相对偏弱。由表2可知,除试件RC1外,其余试件的层间位移角均达到规范对板柱-剪力墙结构要求的1/100弹塑性

层间位移角。因此,配置抗冲切钢筋板柱节点的变形能力可以满足规范<sup>[17]</sup>对板柱-剪力墙结构的抗震性能需求,而无抗冲切钢筋板柱节点的变形能力无法满足规范<sup>[17]</sup>要求。分析可知,抗冲切钢筋能直接承受部分冲切荷载,有效限制板内斜裂缝的开展,与板纵筋形成钢筋骨架约束内部混凝土,因此,有利于提高板柱节点的抗震性能,尤其能有效改善板的延性性能。

表2 主要试验现象和结果

Table 2 Main experimental phenomena and results

试件	抗冲切钢筋类型	破坏裂缝特征	破坏模式/位置	极限不平衡弯矩/(kN·m)	极限层间位移角/%	延性系数
RC1		柱周形成完整环状冲切主裂缝,混凝土未压碎	整体冲切破坏	76.7	0.75	1.26
ST2	螺旋箍筋	柱周形成不完整环状冲切主裂缝,混凝土压碎	局部冲切破坏/加密区域内	86.7	1.60	2.12
ST3	四肢箍筋	柱周形成不连续冲切主裂缝,混凝土压碎	弯冲破坏/加密区域内	98.4	2.68	2.58
ST4	八肢箍筋	柱周未形成冲切主裂缝,混凝土压碎	弯曲破坏/加密区域内	113.6	3.41	3.76
SR5	栓钉	柱周形成不连续冲切主裂缝,混凝土压碎	弯冲破坏/栓钉区域内	90.3	2.00	2.57

注:极限层间位移角和延性系数的计算方法同文献[19-20],即根据能量等值法确定试件的屈服层间位移角,并取骨架曲线上不平衡弯矩下降至极限不平衡弯矩的85%时对应位移角为极限层间位移角,延性系数为极限层间位移角与屈服层间位移角的比值。

### 3.2 暗梁的影响

以RC1为对照试件,试件ST3配置四肢箍筋且暗梁宽度为468 mm,试件ST4配置八肢箍筋且暗梁宽度为688 mm,研究暗梁的宽度和箍筋肢数对板柱节点抗震性能的影响。由表2可知,试件RC1发生脆性的冲切破坏,试件ST3发生具有一定延性的弯冲破坏,试件ST4发生延性较好的弯曲破坏;对比试件RC1,试件ST3的承载力、极限层间位移角和延性系数分别增大28%、257%和105%,试件ST4的相应值分别增大48%、355%和198%。试验结果表明,增加暗梁的宽度和箍筋肢数能有效提高节点的整体抗震性能,尤其能明显改善节点的破坏模式和变形能力。这是由于增加暗梁的宽度和箍筋肢数后,增大了核心混凝土的横截面积,加强了对核心混凝土的约束作用,从而即使在板纵筋大范围屈服后,板依然未发生明显的冲切破坏。

## 4 不平衡弯矩承载力计算

### 4.1 中国规范GB 50010—2010

对于同时承受竖向荷载和水平荷载作用的钢筋混凝土板柱节点,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[16]</sup>附录F采用如图10所示的偏心剪

应力模型,考虑了两种不同的破坏类型:冲切破坏和弯曲破坏。试件的不平衡弯矩承载力计算值 $M_{GB}$ 由 $M_{uv}$ 和 $M_{uf}$ 的较小值得到,即 $M_{GB} = \min(M_{uv}, M_{uf})$ 。当发生冲切破坏时,可得到试件的不平衡弯矩承载力 $M_{uv} = M_v / \alpha_0$ 。

$$M_{uv} = \frac{V_{cs} - V_g}{u_m h_0} I_c / (\alpha_0 \alpha_{AB}) \quad (1)$$

$$V_c = 0.7 f_{tk} \eta \mu_m h_0 \quad (2)$$

$$V_{cs} = 0.7 V_c + 0.8 V_s \leq 1.2 f_{tk} \eta \mu_m h_0 \quad (3)$$

式中: $M_v$ 为剪切传递的不平衡弯矩;对于方柱节点,由剪切传递的不平衡弯矩计算系数 $\alpha_0 = 0.4$ ;  $V_c$ 为无抗冲切钢筋板柱节点的抗冲切承载力;  $V_g$ 为楼板重力荷载在临界截面上产生的冲切反力,等于试验中的千斤顶施加力减去试件自重;  $V_{cs}$ 为配置抗冲切钢筋板柱节点的总的抗冲切承载力;  $V_s$ 为抗冲切钢筋的承载力;其他未注明参数的含义与规范<sup>[16]</sup>相同。

当发生弯曲破坏时,可获得试件的不平衡弯矩承载力 $M_{uf} = M / (1 - \alpha_0)$

$$M_{uf} = M_f / (1 - \alpha_0) = (M_{f1} + M_{f2}) / (1 - \alpha_0) \quad (4)$$

式中: $M_f$ 为弯曲传递的不平衡弯矩;  $M_{f1}$ 和 $M_{f2}$ 分别为 $b_c + 3h$ 板宽范围内负的和正的抗弯承载力。

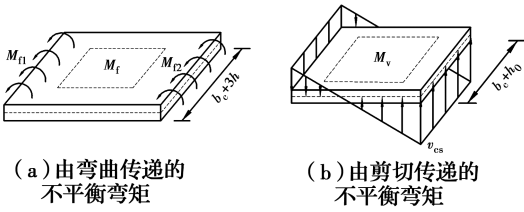


图 10 偏心剪应力模型

Fig. 10 Eccentric shear stress model

对于配置抗冲切钢筋的板柱节点,应考虑抗冲切钢筋区域外发生破坏时试件的不平衡弯矩承载力  $M_{out}$ 。由于在 GB 50010—2010 规范<sup>[16]</sup>中没有明确规定抗冲切钢筋区域外临界截面惯性矩的计算方法,故采用 ACI421.1R-08<sup>[21]</sup>中提出的惯性矩计算公式。当计算  $M_{out}$ 时,临界截面取距离最外圈抗冲切钢筋  $0.5h_0$  处的最不利周长,而混凝土的抗冲切承载力根据规范采用折减系数 0.7。

#### 4.2 规范计算值与试验值比较分析

如表 3 所示,结合已有试验数据<sup>[1-2,4-15,22]</sup>,得到重剪比  $V_g/V_c$  与不平衡弯矩比  $M_{test}/M_{cal}$  (试验值/计算值)的变化关系,如图 11 所示。表 3 中不平衡

弯矩比的平均值、方差和变异系数分别为 1.20、0.41 和 0.34。结果表明:中国规范计算结果与试验结果整体较吻合,但变异系数偏大,离散度偏高,这可能是规范计算公式未考虑尺寸效应、板配筋率和钢筋屈服强度的影响,或者未合理估计抗冲切钢筋的有效承载力。由图 11 可知,随着  $V_g/V_c$  的增大,  $M_{test}/M_{cal}$  没有明显的变化趋势,主要在 0.6~1.5 之间波动,仅有少量数据点(试件的板厚相对较小)明显大于 1.5。

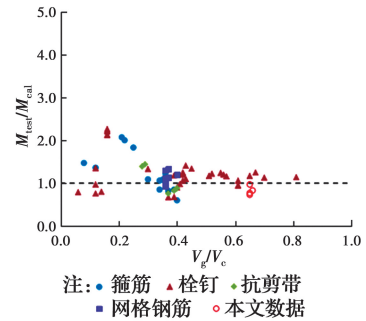


图 11 重剪比与不平衡弯矩比变化关系图

Fig. 11 The relationship between gravity-shear ratio and unbalanced moment ratio

表 3 不平衡弯矩承载力试验值与计算值比较

Table 3 Comparison between experimental and calculated values of unbalanced moment capacity

编号	数据来源	试件	抗剪钢筋类型	$f_{cu}/$ MPa	$\rho_t/$ %	$\rho_b/$ %	$V_g/$ kN	$M_{test}/$ (kN·m)	$V_g/V_c$	$M_{uv}/$ (kN·m)	$M_{ut}/$ (kN·m)	$M_{out}/$ (kN·m)	$M_{cal}/$ (kN·m)	$M_{test}/$ $M_{cal}$
1		SS1	双肢箍筋	34.5	1.31	0.58	133.0	159.4	0.36	175.2	129.7	278.5	129.7	1.23
2		SS2	双肢箍筋	32.1	0.91	0.49	126.3	112.3	0.34	127.0	105.9	204.4	105.9	1.06
3	文献[1]	SS3	双肢箍筋	32.3	1.97	0.87	126.8	183.8	0.35	169.6	181.0	241.7	169.6	1.08
4		SS4	双肢箍筋	34.5	1.97	0.87	127.7	151.3	0.34	177.0	183.0	253.3	177.0	0.85
5		SS5	双肢箍筋	40.2	1.97	0.87	125.9	151.3	0.30	139.1	200.7	273.7	139.1	1.09
6		6CS	四肢箍筋	35.2	1.15	0.57	35.6	38.4	0.22	57.3	19.2	196.9	19.2	2.00
7	文献[2]	7CS	双肢箍筋	37.1	1.15	0.57	35.6	41.7	0.21	54.0	20.1	203.5	20.1	2.07
8		8CS	双肢箍筋	27.7	1.15	0.57	35.6	34.9	0.25	35.0	19.1	168.4	19.1	1.83
9		LR-A1	网格钢筋	28.1	1.06	0.79	132.1	132.0	0.40	143.8	109.9	113.5	109.9	1.20
10		LR-A2	网格钢筋	28.1	1.06	0.79	132.1	130.4	0.40	143.8	109.9	113.5	109.9	1.19
11		SR-A	栓钉	28.1	1.06	0.79	132.1	98.9	0.40	147.9	109.9	190.0	109.9	0.90
12		SB-A	抗剪带	28.1	1.06	0.79	132.1	96.7	0.40	147.9	109.9	380.6	109.9	0.88
13	文献[4]	ST-A	四肢箍筋	28.1	1.06	0.79	132.1	66.1	0.40	147.2	109.9	174.7	109.9	0.60
14		LR-B1	网格钢筋	48.4	1.06	0.79	158.8	129.1	0.37	159.1	114.6	396.1	114.6	1.13
15		LR-B2	网格钢筋	48.4	1.06	0.79	158.8	152.0	0.37	159.1	114.6	396.1	114.6	1.33
16		SR-B	栓钉	48.4	1.06	0.79	158.8	77.1	0.37	185.6	114.6	259.6	114.6	0.67
17		SB-B	抗剪带	48.4	1.06	0.79	158.8	86.8	0.37	198.8	114.6	514.1	114.6	0.76
18		ST-B	四肢箍筋	48.4	1.06	0.79	158.8	93.8	0.37	162.6	114.6	238.7	114.6	0.82

续表 3

编号	数据来源	试件	抗剪钢筋类型	$f_{cu}/$ MPa	$\rho_t/$ %	$\rho_b/$ %	$V_g/$ kN	$M_{test}/$ (kN·m)	$V_g/V_c$	$M_{uv}/$ (kN·m)	$M_{ut}/$ (kN·m)	$M_{out}/$ (kN·m)	$M_{cal}/$ (kN·m)	$M_{test}/$ $M_{cal}$
19		2CS	双臂箍筋	39.2	0.81	0.50	33.8	63.9	0.12	78.8	46.9	423.6	46.9	1.36
20	文献[5]	3SL	单肢箍筋	54.3	0.81	0.50	24.9	70.0	0.08	89.3	47.5	496.7	47.5	1.47
21		4HS	栓钉	47.8	0.81	0.50	35.6	63.9	0.12	120.1	47.3	461.3	47.3	1.35
22		SR1	四肢箍筋	48.4	1.06	0.79	165.1	101.4	0.39	160.1	119.3	262.2	119.3	0.85
23	文献[6]	SR2	栓钉	48.4	1.06	0.79	165.1	81.4	0.39	183.0	119.3	266.4	119.3	0.68
24		SR3	抗剪带	48.4	1.06	0.79	165.1	99.2	0.39	196.3	119.3	462.9	119.3	0.83
25		S1-C2	栓钉	53.0	1.62	0.68	168.0	151.0	0.41	154.9	161.2	354.2	154.9	0.98
26	文献[7]	S2-C2	栓钉	41.0	1.22	0.61	155.1	133.9	0.42	106.9	130.5	318.1	106.9	1.25
27		CD3	栓钉	44.5	1.44	0.47	299.8	84.4	0.81	74.0	97.2	248.0	74.0	1.14
28	文献[8]	CD4	栓钉	42.9	1.44	0.47	200.2	120.0	0.55	103.1	97.0	331.1	97.0	1.24
29		CD6	栓钉	39.2	1.44	0.47	200.2	112.0	0.57	121.3	96.5	294.3	96.5	1.16
30		CD7	栓钉	35.7	1.44	0.47	149.9	128.4	0.45	111.7	95.8	332.5	95.8	1.34
31		SJB-1	栓钉	40.2	1.31	0.42	149.9	112.0	0.43	115.7	101.9	149.1	101.9	1.10
32		SJB-2	栓钉	42.9	1.56	0.42	149.9	138.0	0.42	117.7	115.1	155.3	115.1	1.20
33	文献[9]	SJB-3	栓钉	40.5	1.31	0.42	149.9	144.0	0.43	115.9	101.9	290.4	101.9	1.41
34		SJB-4	栓钉	49.6	1.56	0.42	149.9	137.0	0.39	122.2	116.4	325.5	116.4	1.18
35		SJB-5	栓钉	41.7	2.13	0.42	149.9	124.0	0.42	116.8	142.4	295.7	116.8	1.06
36	文献[10]	18c	栓钉	43.3	0.98	0.39	355.8	208.0	0.61	243.6	222.4	822.1	222.4	0.94
37		18d	栓钉	43.3	0.71	0.30	355.8	156.0	0.61	243.6	164.5	822.1	164.5	0.95
38		PS2.5	抗剪带	43.9	0.61	0.23	125.0	106.0	0.29	128.7	73.4	297.8	73.4	1.44
39	文献[11]	PS3.5	抗剪带	43.9	0.61	0.23	120.0	102.0	0.28	87.3	73.4	194.6	73.4	1.39
40		HS2.5	栓钉	43.9	0.61	0.23	133.0	98.0	0.30	104.9	73.4	251.7	73.4	1.33
41		1	栓钉	57.8	1.08	0.46	23.6	37.5	0.06	159.5	47.5	265.1	47.5	0.79
42	文献[12]	2	栓钉	57.7	1.08	0.46	42.9	36.0	0.12	153.1	47.5	251.6	47.5	0.76
43		3	栓钉	57.7	1.08	0.46	43.8	46.0	0.12	190.9	47.5	327.1	47.5	0.97
44		4	栓钉	40.9	1.08	0.46	43.2	37.4	0.14	165.6	46.9	282.2	46.9	0.80
45		C-SSR3	栓钉	44.0	0.96	0.67	196.4	135.9	0.52	111.2	131.9	121.3	111.2	1.22
46	文献[13]	C-SSR5a	栓钉	29.0	0.96	0.67	169.2	124.2	0.56	103.1	127.2	161.8	103.1	1.20
47		C-SSR5b	栓钉	58.0	0.97	0.67	213.9	132.5	0.51	112.8	134.7	234.9	112.8	1.17
48		C-SSR5c	栓钉	70.0	0.96	0.66	275.0	107.8	0.61	101.7	137.1	221.4	101.7	1.06
49		Joint1	栓钉	46.2	0.90	0.57	376.0	104.6	0.70	106.5	92.2	167.9	92.2	1.13
50	文献[14]	Joint2	栓钉	50.0	0.90	0.57	376.0	115.2	0.67	216.7	92.4	182.2	92.4	1.25
51		Joint3	栓钉	55.4	0.90	0.57	376.0	108.6	0.65	149.0	92.7	240.8	92.7	1.17
52		SC1	栓钉	39.7	0.87	0.87	57.7	108.9	0.16	224.5	49.3	177.1	49.3	2.21
53		SC2	栓钉	39.7	0.87	0.87	57.7	105.1	0.16	216.2	49.3	283.9	49.3	2.13
54	文献[15]	SC3	栓钉	39.7	0.87	0.87	57.7	104.8	0.16	216.2	49.3	207.8	49.3	2.12
55		SC4	栓钉	39.7	0.87	0.87	57.7	110.2	0.16	216.2	49.3	132.9	49.3	2.23
56		SC5	栓钉	39.7	0.87	0.87	57.7	111.3	0.16	196.4	49.3	148.7	49.3	2.26
57		LR-A	网格钢筋	33.7	1.20	0.86	139.2	118.1	0.36	105.6	163.4	924.4	105.6	1.12
58		LR-B	网格钢筋	41.7	1.20	0.86	153.0	110.7	0.36	109.6	164.0	288.0	109.6	1.01
59	文献[23]	LR-C	网格钢筋	44.2	1.20	0.86	159.2	128.9	0.36	138.7	164.8	331.1	138.7	0.93
60		LR-D	网格钢筋	51.0	1.20	0.86	169.5	107.6	0.36	112.6	166.4	127.5	112.6	0.96
61		LR-E	网格钢筋	43.4	1.20	0.86	157.0	142.7	0.36	109.9	164.5	346.0	109.9	1.30



续表 3

编号	数据来源	试件	抗剪钢筋类型	$f_{cu}/$ MPa	$\rho_t/$ %	$\rho_b/$ %	$V_g/$ kN	$M_{test}/$ (kN·m)	$V_g/V_c$	$M_{uv}/$ (kN·m)	$M_{uf}/$ (kN·m)	$M_{out}/$ (kN·m)	$M_{cal}/$ (kN·m)	$M_{test}/$ $M_{cal}$
62	本文	ST2	螺旋箍筋	42.0	0.73	0.73	326.8	86.7	0.65	134.0	118.0	278.7	118.0	0.73
63		ST3	四肢箍筋	42.4	0.73	0.73	328.5	98.4	0.66	167.3	118.0	268.0	118.0	0.83
64		ST4	八肢箍筋	38.0	0.73	0.73	309.3	113.6	0.65	199.6	117.4	287.3	117.4	0.97
65		SR5	栓钉	35.0	0.73	0.73	295.6	90.3	0.65	141.3	116.8	217.4	116.8	0.77
平均值														1.20
标准差														0.41

注:  $\rho_t$  为  $b_c + 3h$  范围内板顶纵筋配筋率;  $\rho_b$  为  $b_c + 3h$  范围内板底纵筋配筋率;  $M_{cal} = \min\{M_{uv}, M_{uf}, M_{out}\}$ , 为基于中国规范 GB 50010—2010 得到的不平衡弯矩承载力计算值;  $M_{test}$  为试验不平衡弯矩。

## 5 结论

1) 配置抗冲切钢筋可以提高板柱节点的不平衡弯矩承载力, 而延性性能的改善更加明显。相比无抗冲切钢筋板柱节点, 其层间位移角延性系数和不平衡弯矩承载力的提高幅度范围分别为 68%~198% 和 13%~48%。

2) 在高竖向荷载作用下, 配置抗冲切钢筋板柱节点的变形能力可以满足规范对板柱-剪力墙结构的抗震性能需求, 而无抗冲切钢筋板柱节点的变形能力无法满足规范要求。

3) 重剪比高的板柱节点易发生脆性的冲切破坏, 合理设计暗梁的宽度和箍筋肢数有利于节点发生延性的弯冲破坏或弯曲破坏; 暗梁采用四肢箍筋且宽度取柱宽加上柱两侧各 0.5 倍有效板厚是合理且经济的。

4) 中国规范对于配置抗冲切钢筋板柱节点的不平衡弯矩承载力的计算结果与试验结果整体较吻合, 但离散程度偏高; 对于板厚较小的板柱节点的不平衡弯矩承载力预测结果过于保守。

本文的分析及结论仅适用于与文中实验条件一致的前提条件, 即竖向荷载作用下, 板已经产生了“辐射状裂缝以及少量柱周的环向裂缝”。

## 参考文献:

- [1] HAWKINS N M, MITCHELL D, HANNA S N. The effects of shear reinforcement on the reversed cyclic loading behavior of flat plate structures [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1975, 2(4): 572-582.
- [2] 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.
- [3] ROBERTSON I N. Seismic response of connections in indeterminate flat-slab subassemblies [D]. Houston, US: Rice University, 1990: 258.
- [4] PARK H G, KIM Y N, SONG J G, et al. Lattice shear reinforcement for enhancement of slab-column connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(3): 425-437.
- [5] ROBERTSON I N, KAWAI T, LEE J, et al. Cyclic testing of slab-column connections with shear reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 2002, 99(5): 605-613.
- [6] SONG J K, KIM J, SONG H B, et al. Effective punching shear and moment capacity of flat plate-column connection with shear reinforcements for lateral loading [J]. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2012, 6(1): 19-29.
- [7] DECHKA D C. Response of shear-stud-reinforced continuous slab-column frames to seismic loads [D]. Calgary, Canada: University of Calgary, 2001: 472.
- [8] CAO H J. Seismic design of slab-column connections [D]. Alberta, Canada: University of Calgary, 1993: 185.
- [9] BROWN S J. Seismic response of slab column connections [D]. Alberta, Canada: University of Calgary, 2003: 341.
- [10] BROMS C E. Flat plates in seismic areas: Comparison of shear reinforcement systems [J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(6): 712-721.
- [11] KANG T H, WALLACE J W. Seismic performance of reinforced concrete slab-column connections with thin plate stirrups [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(5): 617-625.
- [12] GUNADI R, BUDIONO B, IMRAN I, et al. The

- behavior of slab-column connections with modified shear reinforcement under cyclic load [J]. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 2014, 46(1): 17-36.
- [13] ISUFI B, PINHO RAMOS A, LÚCIO V. Reversed horizontal cyclic loading tests of flat slab specimens with studs as shear reinforcement [J]. *Structural Concrete*, 2019, 20(1): 330-347.
- [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] 康婧. 配有锚栓的钢筋混凝土板柱节点抗震性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- KANG J. Seismic behavior of RC slab-column connections with shear-stud reinforcement [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [18] 无粘结预应力混凝土结构技术规程: JGJ 92—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Technical specification for concrete structure prestressed with unbonded tendons: JGJ 92-2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [19] 黄强, 付瑞佳, 李林, 等. 板柱边节点抗震性能研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(Sup1): 13-16.
- HUANG Q, FU R J, LI L, et al. Study on seismic behavior of edge slab-column connection [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(Sup1): 13-16. (in Chinese)
- [20] 李艳艳, 李明炆, 苏恒博. 高强钢筋高韧性混凝土框架中节点抗震性能试验研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2017, 39(1): 86-92.
- LI Y Y, LI M Y, SU H B. Experimental analysis of seismic behavior of interior joints with high-strength reinforcement and high-toughness concrete [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2017, 39(1): 86-92. (in Chinese)
- [21] Joint ACI-ASCE Committee 421. Shear Reinforcement for Slabs (ACI 421. 1R-08) [R]. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1999, 15.
- [22] KANG S M, PARK H G, KIM Y N. Lattice-reinforced slab-column connections under cyclic lateral loading [J]. *ACI Structural Journal*, 2013, 110(6): 929-939.

(编辑 王秀玲)