

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.020

# 重剪比对板柱节点抗震性能的影响

凌飞鹏<sup>1</sup>, 刘国梁<sup>2</sup>, 刘世建<sup>3\*</sup>, 韦港荣<sup>4</sup>(1. 广西路桥工程集团有限公司, 广西 南宁 530200; 2. 长沙市西工建设有限公司;  
3. 广西交投集团有限公司; 4. 广西北部湾投资集团有限公司)

**摘要:**针对重剪比分别为0.3、0.5、0.7的3个板柱节点试件进行了抗震试验,并通过Abaqus有限元软件将模拟结果与试验结果进行了对比,研究了重剪比对无抗冲切钢筋的板柱节点抗震性能的影响。结果表明:试验结果与模拟结果拟合较好,重剪比增加,试件的不平衡弯矩承载力降低,同时耗能能力也减弱。重剪比最低的S1试件仅发生局部冲切破坏,其余试件均发生完全冲切破坏,一定程度上可认为重剪比越大,板柱节点的抗震性能越弱。同时该文对中、美、欧3种规范计算结果与试验结果和历史数据进行了对比,发现中美两国规范计算出的不平衡弯矩相比实际情况较大,而欧洲规范计算结果贴合实际,原因可能是欧洲规范计算时考虑了配筋率的影响,且在重剪比大于0.3时需对中国规范计算结果进行修正,修正后的结果更符合设计且离散度明显降低。

**关键词:**板柱节点;重剪比;Abaqus有限元;抗震性能;破坏形式

## 1 前言

板柱结构顾名思义是以板与柱承重的结构体系,因其具有可缩短施工工期、降低造价等优点,常用于仓库、办公楼等建筑中,而相比于传统钢筋混凝土框架结构,无冲切钢筋的板柱结构的抗侧刚度较低、抗震性能较差。1985年的墨西哥地震导致近100幢板柱结构房屋遭到不同等级破坏。

国内外专家学者对板柱节点的抗震性能进行了大量研究。Stefano等针对低配筋率的板柱节点,以结构尺寸为研究变量,分别进行了1/2缩尺、全尺寸、2倍尺寸的3组试验,以研究尺寸效应对板柱节点抗冲切性能的影响;Megally等针对配置栓钉的板柱节点进行了试验研究,并以栓钉布置方式、重剪比等为变量研究了栓钉对板柱节点抗震性能的影响,研究表明:重剪比对板柱节点的层间位移角有较大影响,增大重剪比可在一定程度上提高板柱节点抗侧刚度与变形能力;Pan研究了重剪比对板柱节点抗震性能的影响,研究表明重剪比为0.4以下时板柱节点的层间位移角达到1.5%并不发生冲切破坏;唐明等研究了冲切钢筋对板

柱节点抗震性能的影响,结果表明:配置了4肢箍筋的试件可满足中国规范对板柱节点抗震性能要求。

到目前为止,中国对于无抗冲切钢筋的板柱节点的研究多集中于静力试验,而很少研究板柱节点的抗震性能,现有试验的加载方式大多与结构实际受力状态存在区别。且中国规范对于钢筋混凝土板柱节点的应用有较多限制,因此该文以重剪比为试验变量,对无抗冲切钢筋的板柱节点进行试验研究,并基于Abaqus有限元平台对试验结果进行验证,研究重剪比对板柱节点抗震性能的影响,并核验基于静力试验建立的抗冲切公式的正确性,以其为板柱节点的抗震性能研究和相关规范修订提供试验依据。

## 2 试验方案与数值模拟

### 2.1 试件设计

试件原型为7层钢筋混凝土板柱结构,见图1。

原结构层高3m,每跨间距7.5m,板厚0.23m,取原结构中的内柱节点为研究对象,以1/2的比例进行缩尺。反弯点位置为1/4跨度处。

试验共设计3个试件,编号为S1~S3,各试件的

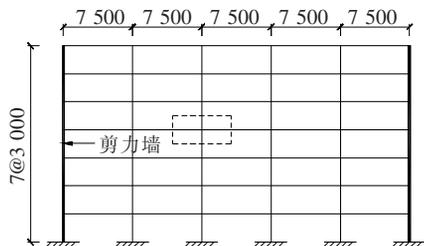
收稿日期:2020-03-12

基金项目:国家重点研发计划—政府间国际科技创新合作重点专项—中美政府间合作项目(编号:2017YFE0103000)

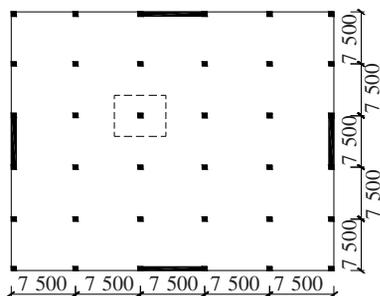
作者简介:凌飞鹏,男,硕士,高级工程师。E-mail:17318927@qq.com

\*通信作者:刘世建,男,硕士,教授级高工。E-mail:619234134@qq.com

几何尺寸、配筋率等均相同,仅重剪比不同,根据材性试验测得的混凝土强度标准值计算得一般条件下试件重剪比为0.5,设计S1~S3试件的重剪比分别为0.3、0.5、0.7。各试件的纵筋均为双层双向布置,且板顶配筋率均为0.8%,各试件如图2所示。

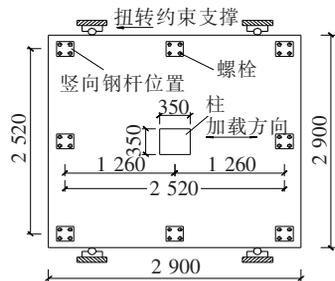


(a) 立面图

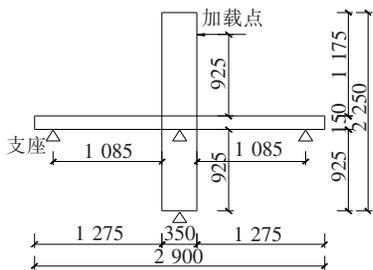


(b) 平面图

图1 原结构几何示意图(单位:mm)



(a) 平面图



(b) 立面图

图2 各试件几何示意图(单位:mm)

## 2.2 材料参数

各试件均采用C40混凝土,纵筋为直径12 mm的HRB400钢筋,经材性试验测得各试件混凝土立方体平

均抗压强度 $f_{cu}$ 与钢筋屈服强度 $f_y$ 见表1。

表1 材料主要参数

试件名称	$f_{cu}/\text{MPa}$	$f_y/\text{MPa}$	重剪比
S1	40.0	421.0	0.3
S2	41.2	421.0	0.5
S3	39.3	421.0	0.7

## 2.3 加载方案

试验加载设备为大型多功能结构试验系统,竖向加载使用反力架和2个150 t作动器,行程为0~400 mm,水平向主动跟随;水平向加载使用反力墙和1个100 t作动器,行程为±500 mm。试验力测量范围为(4%~100%)(满量程),示值精度为±1%;位移分辨率为0.01 mm。

加载分为两部分:第1部分为静力加载,在柱底施加10 kN/m<sup>2</sup>的轴向荷载;第2部分为以位移控制加载的低周往复荷载,位移增量为5 mm,加载曲线见图3。

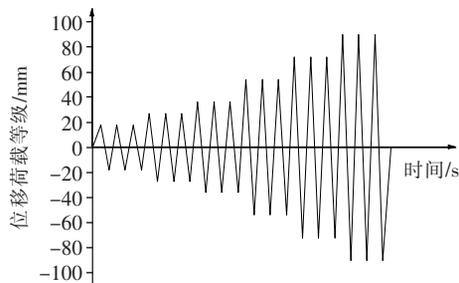


图3 加载方案

## 2.4 数值模拟

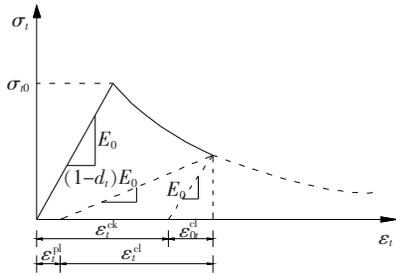
混凝土与钢板采用实体单元C3D8R,钢筋采用桁架单元T3D2,忽略钢筋与混凝土之间的黏结作用,使用Abaqus中的embedded命令将钢筋嵌入混凝土中。混凝土采用塑性损伤本构模型,依据受压及受拉损伤因子模拟混凝土在地震过程中的刚度退化,使用能量法计算损伤因子;塑性损伤本构模型如图4所示;钢筋本构模型采用理想弹塑性双折线模型,如图5所示。

图4、5中: $\epsilon_t$ 为拉应变; $\sigma_t$ 为非弹性拉应力; $\sigma_{t0}$ 为弹性极限拉应力; $E_0$ 为初始弹性模量; $d_t$ 为受拉损伤演化参数; $\bar{\epsilon}_t^{ck}$ 为受拉开裂应变; $\bar{\epsilon}_t^{cl}$ 为初始刚度下弹性拉应变; $\bar{\epsilon}_t^{pl}$ 为等效塑性拉应变; $\bar{\epsilon}_t^{cd}$ 为可恢复的拉伸弹性应变。

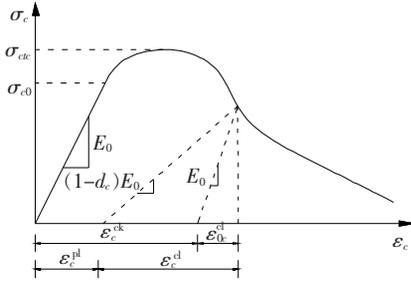
## 3 试验结果与有限元验证

### 3.1 破坏形态

各试件板顶裂缝见图6。

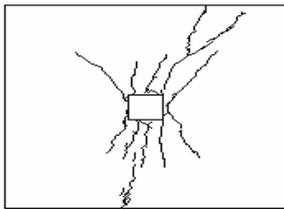


(a) 单轴受拉

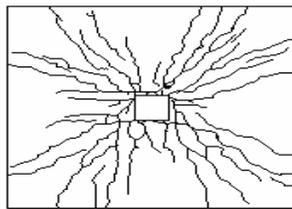


(b) 单轴受压

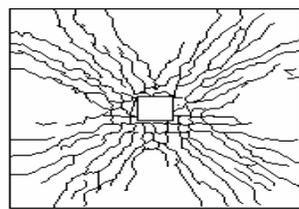
图 4 混凝土塑性损伤模型应力应变曲线图



(a) S1



(b) S2



(c) S3

图 6 各试件板顶裂缝分布图

时已失去水平承载力,但仍可以承受竖向荷载,仅局部发生冲切破坏。对于 S3 试件,水平加载至 0.75% 位移角时柱周主裂缝已成环状,试件整体发生冲切破坏。对于 S2 试件,加载至 1.25% 位移角时试件发生整体冲切破坏,虽相较 S1 试件发生破坏时间较早,但其发生破坏后仍可承受竖向荷载。

总体而言,重剪比最低的 S1 试件发生局部冲切破坏,而 S2 与 S3 试件发生整体冲切破坏。S1~S3 发生屈服时所对应的加载大小分别为 1.2%、0.76%、0.5% 层间位移角,发生破坏时所对应的加载大小分别为 2.2%、1.3%、0.76% 层间位移角。由此可发现:在其余条件相同的情况下,重剪比是影响板柱结构破坏形式的重要因素,重剪比越大,板柱结构发生破坏时需要的荷载越小,对结构抗震性能的影响越不利。

### 3.2 滞回性能

图 7 为试验得到的荷载一位移滞回曲线。图中曲线面积为低周往复荷载作用一周时结构的耗能,曲线形状越饱满表示结构抗震性能越好。

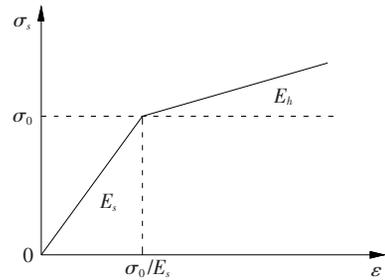


图 5 钢筋本构模型图

由图 6 可知:当只有竖向荷载作用时,S2 与 S3 试件的裂缝呈放射状延伸至四周,而 S1 试件的裂缝仅延伸至两个方向。各试件的裂缝形态与位置有较大差异。在水平加载过程中,各试件均发生冲切破坏,其中重剪比最高的 S3 试件在加载前就已出现对角裂缝。S1 的重剪比最低,水平加载至 0.5% 层间位移角时开始出现裂缝,加载至 2.25% 时已完成第 1 个加载循环,在除西面外的另三面开始形成主裂缝,S1 试件此

由图 7 可知:各试件模拟结果与试验结果拟合较好。S1 与 S2 试件的滞回曲线明显较为饱满,表明其抗震性能良好,S1 试件的重剪比最低,其承载力最高,S2 其次,且 S1 与 S2 试件的承载力明显高于 S3 试件。

滞回曲线的面积表明该试件的耗能大小,由图 7 可知:S1 试件的耗能能力最强,S3 试件的耗能能力最弱。相比于 S3 试件,S1 与 S2 的耗能能力分别提高了 48.3% 与 35.7%。

由上可知:板柱结构承受的竖向荷载越大,其板顶的开裂情况越严重,从而降低试件的耗能能力。在水平加载阶段,高重剪比的试件其破坏更严重,钢筋屈服速度更快,承载力更低,从而可认为高重剪比试件的抗震性能较差。

## 4 各国规范对比

中国规范与美国规范认为,不平衡弯矩的 60% 由

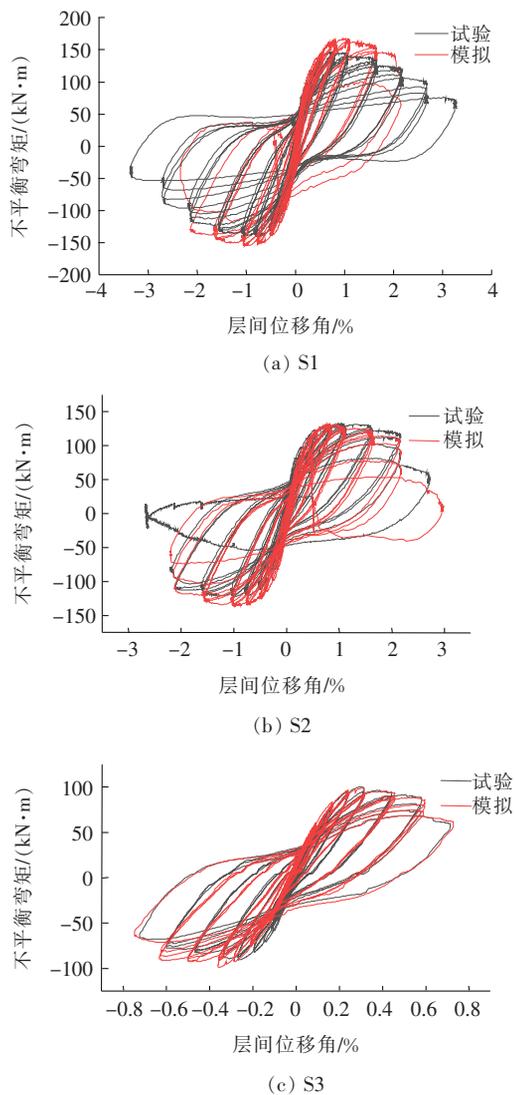


图7 各试件滞回曲线

表2 试验结果与各国规范计算结果对比

项目	试验结果		中国规范		美国规范		欧洲规范	
	$V_g/\text{kN}$	$M_u/(\text{kN}\cdot\text{m})$	重剪比 $V_g/F_l$	$M_u/M_{GB}$	重剪比 $V_g/V_c$	$M_u/M_{ACI}$	重剪比 $V_g/V_{Ed}$	$M_u/M_{Ed}$
文献[5]C50	203.4	80.4	0.46	1.08	0.49	1.19	0.52	1.04
文献[5]C50	167.4	110.5	0.38	1.28	0.40	1.38	0.43	1.19
文献[5]C50	131.3	130.7	0.28	1.21	0.28	1.22	0.31	1.08
文献[6]C1	30.4	30.1	0.20	1.66	1.22	1.68	0.26	0.79
文献[6]C2	46.5	35.9	0.31	1.99	0.33	2.01	0.41	0.95
文献[6]C3	39.4	52.2	0.21	1.27	0.23	1.41	0.23	0.91
S1 试件	144.1	136.2	0.28	1.21	0.28	1.22	0.31	1.08
S2 试件	236.3	98.3	0.18	1.22	0.17	1.47	0.19	0.99
S3 试件	312.2	75.3	0.08	1.60	0.09	2.73	0.12	0.85
平均值				1.39		1.60		0.99
标准差				0.37		0.42		0.22

注:  $M_u$  为依各国规范计算的不平衡弯矩,其他参数见上文。

受弯钢筋传递,40%由混凝土临界截面的线性剪应力传递,中、美、欧洲规范计算不平衡弯矩的公式分别见式(1)~(3)。

$$M_{GB} = \min\left\{\frac{5(F_l - V_g)I_c}{u_m h_0(c + h_0)}, \frac{M_{f,1} + M_{f,2}}{0.6}\right\} \quad (1)$$

式中:  $M_{GB}$  为不平衡弯矩(中国规范);  $F_l$  为混凝土抗冲切承载力;  $I_c$  为极惯性矩;  $M_{f,1}$  与  $M_{f,2}$  分别为板顶与板底的钢筋抗弯承载力;  $u_m$  为临界周长;  $V_g$  为重力荷载。

$$M_{ACI} = \min\left\{\frac{5(V_c - V_g)J_c}{u_m h_0(c + h_0)}, \frac{M_{f,1} + M_{f,2}}{0.6}\right\} \quad (2)$$

式中:  $M_{ACI}$  为不平衡弯矩(美国规范);  $V_c$  为混凝土抗冲切承载力;  $J_c$  为极惯性矩。

$$M_{Ed} = \frac{5}{3}\left(V_{Rd,c} - \frac{V_g}{u_1 h_0}\right)W_1 h_0 \quad (3)$$

式中:  $M_{Ed}$  为不平衡弯矩(欧洲规范);  $V_{Rd,c}$  为混凝土剪应力;  $W_1$  为临界周长的函数。

将该文试验结果及有关参考文献数据,分别与3种规范计算结果进行对比,结果见表2。

由表2可知:由中美规范计算得到的不平衡弯矩相比实际情况均偏大,使用欧洲规范计算得到的结果十分贴合实际。由此可知,中美规范均认为不平衡弯矩的60%由受弯钢筋传递,40%由混凝土临界截面的线性剪应力传递,而欧洲规范计算方法与中美规范存在较大差异,考虑了配筋率的影响,是造成计算结果不同的主要原因。

图8为根据表2结果绘制的重剪比对不平衡弯矩的影响。

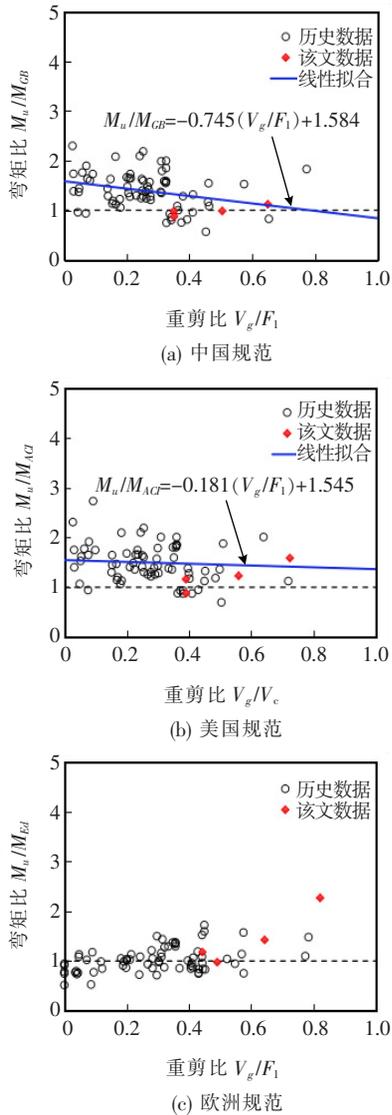


图 8 重剪比对不平衡弯矩影响

由图 8 可知:当重剪比大于 0.3 时,中美规范存在高估不平衡弯矩承载力的可能性,偏于不安全,需要对高剪重比下的计算结果进行修正,采用最小二乘法得到的线性拟合公式可使计算结果偏于安全,并明显降低离散度;与中美规范相比,欧洲规范的计算结果对于重剪比的变化规律较之不明显且离散度较低。

## 5 结论

针对重剪比分别为 0.3、0.5、0.7 的 3 个试件进行

了低周往复加载试验,并将 Abaqus 有限元软件计算结果与试验结果进行了对比,最后将试验结果与中、美、欧 3 种规范计算结果进行了对比,得出如下结论:

(1) 重剪比是影响板柱节点抗震性能的主要原因,其他条件均相同时,结构的重剪比为 0.3~0.8 可认为重剪比越大,板柱结构的抗震性能越弱。结构的耗能能力、承载能力等均随重剪比的增加而减弱。

(2) 重剪比是影响板柱结构破坏形式的重要因素,重剪比最小的 S1 试件仅发生局部冲切破坏,而 S2 与 S3 试件均发生整体冲切破坏,且重剪比越大,板柱结构发生破坏时需要的荷载越小,对结构抗震性能的影响越不利。

(3) 中国规范与美国规范对板柱节点的不平衡弯矩计算结果偏安全,欧洲规范与实际情况十分接近。而在重剪比大于 0.3 时,需要对中国规范的计算结果采用最小二乘法得到的线性拟合公式进行部分修正。

## 参考文献:

- [1] Stefano, JIR SA J O, BAYRAK O. Strength Evaluation of Interior Slab-Column Connections[J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(6): 692-700.
- [2] MEGALLY S, GHALI A. Punching Shear Design of Earthquake-Resistant Slab-Column Connections[J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(5): 720-730.
- [3] PAN A D, MOEHLE J P. An Experimental Study of Slab-Column Connections[J]. ACI Structural Journal, 1992, 89(6): 626-638.
- [4] 唐明, 易伟建. 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(5).
- [5] LUO Y H, DURRANI A J, CONTE J P. Equivalent-frame Analysis of Flat Plate Buildings for Seismic Loading[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(7): 2 137-2 155.
- [6] MUTTONI A. Punching Shear Strength of Reinforced-concrete Slabs without Transverse Reinforcement [J]. ACI Structural Journal, 2009, 105(4): 440-450.
- [7] 扶长生, 吕西林, 康婧. 柱支承双向板及板柱节点的设计与研究[J]. 建筑结构学报, 2009(2).
- [8] GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S].
- [9] 赵晋, 易伟建, 朱泽华. 板柱节点冲切破坏后受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015(7).