

# 钢管混凝土柱-钢蜂窝梁中柱节点 弯矩-转角骨架曲线影响因素

李明<sup>1,2</sup>, 张沛楠<sup>1</sup>, 王元清<sup>2</sup>, 刘勇<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

**摘要** 目的 分析不同因素对外加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁中柱节点弯矩-转角骨架曲线的影响, 确定影响节点“强柱弱梁”屈服机制的重要因素, 为该种节点的设计提供参考。方法 设计了24个钢材屈服强度、含钢率等参数不同的节点, 采用有限元软件模拟了全部节点在低周往复荷载作用下的受力过程, 分析了不同参数对弯矩-转角骨架曲线的影响, 模拟前采用已有文献试验结果验证了模拟方法。结果 钢材屈服强度、含钢率和梁柱线刚度比的增大, 该种节点的抗弯承载力、极限抗弯承载力和初始刚度明显增大; 轴压比对节点弯矩-转角骨架曲线影响很小; 加强环板宽度增加, 对节点的抗弯承载力、极限抗弯承载力和初始刚度提高幅度不大; 距离和孔间距增大或开孔率减小, 节点的抗弯承载力、极限抗弯承载力和初始刚度有所增加, 但增加幅度不大, 并且增加程度在非弹性阶段更为明显。结论 开孔率、距离和孔间距是引起该种节点更容易实现“强柱弱梁”屈服机制的重要因素, 影响程度开孔率最大、孔间距最小。

**关键词** 外加强环; 钢管混凝土柱; 钢蜂窝梁; 弯矩-转角; 骨架曲线

中图分类号 TU392

文献标志码 A

## Influencing Factors on CFCST-SCBIJ Moment-Curvature Skeleton Curves

LI Ming<sup>1,2</sup>, ZHANG Peinan<sup>1</sup>, WANG Yuanqing<sup>2</sup>, LIU Yong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, 100084)

**Abstract:** In order to provide a basis for how to design concrete filled circular steel tube-steel casted beam interior joint with outer annular-stiffener (CFCST-SCBIJ), the factors that influence the moment-curvature skeleton curves are analyzed. 24 such joints with different parameters, including steel yield strength, steel ratio etc, are designed and their load-bearing process under low cy-

收稿日期: 2015-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(513083856); 中国博士后基金面上项目(2014M560938); 沈阳建筑大学学科涵育项目(XKHY2-22)

作者简介: 李明(1979—), 男, 副教授, 博士后, 主要从事钢筋混凝土组合结构等研究。

clic repeated horizontal load is simulated with finite element software. The simulation method is tested by the previous result in the existed paper before simulation. The factors that influence the moment-curvature skeleton curves are analyzed. It shows that: the flexural bearing capacity (FBC), the ultimate flexural bearing capacity( UFBC) and the initial stiffness( IS) of the joints increases obviously with the increasing of steel yield strength, steel ratio and beam to column linear stiffness ratio; the axial compression ratio has little influence on the moment-curvature curves; with the increase of the width of outer annular-stiffener, the increasing extend of the FBC, the UFBC and the IS is not large; with the increase of the distance and the distance of the adjacent holes or the decrease of the opening rate, the FBC, the UFBC and the IS of the joint increases, but the increasing extend is small and it is more obvious in inelastic stage. It can be concluded that the distance, the distance of the adjacent holes and the opening rate are the important parameters that make OATCFCST-SCBIJ are easier to realize the yield mechanism of “strong column and weak beam”, of which the opening rate has the largest influence and the distance of the adjacent holes has the smallest influence.

**Key words:** annular-stiffener; CFST; castellated beam; moment-curvature; skeleton curve

钢管混凝土柱具有塑性韧性好、承载力高、施工方便、耐火性好等优点<sup>[1-5]</sup>；钢蜂窝梁具有用钢量小、蜂窝孔便于管线穿行等优点，二者在土木工程中应用日益广泛<sup>[6-9]</sup>。地震时二者连接形成的节点，钢管混凝土柱由于钢管的存在，核心内混凝土不会崩落；钢蜂窝梁由于自身蜂窝的存在，梁端更容易屈服。因此节点更容易形成“强柱弱梁”的屈服机制。目前有关连接节点抗震性能的定量分析还较少<sup>[10-16]</sup>。鉴于此，笔者设计了 24 个钢材屈服强度、含钢率、轴压比、梁柱线刚度比、孔间距等参数不同的外加强环式圆钢管混凝土柱 – 钢蜂窝梁中柱节点，提取了这些节点在低周往复荷载作用下的弯矩 – 转角 ( $M - \theta$ ) 骨架曲线，分析了这些参数对该曲线的影响，为该种节点的设计提供参考<sup>[17-20]</sup>。

### 1 外加强环式圆钢管混凝土柱 – 钢蜂窝梁中柱节点的设计

外加强环式圆钢管混凝土柱 – 钢蜂窝梁中柱节点的构造如图 1 所示，节点参数如表 1 所示。含钢率为钢管混凝土柱截面的含钢率，距离为柱边到钢蜂窝梁梁端第一个开孔中心的距离，孔间距为钢蜂窝梁中两相邻孔洞中心的距离、开孔率为钢蜂窝梁孔直径与

梁截面高度的比值。

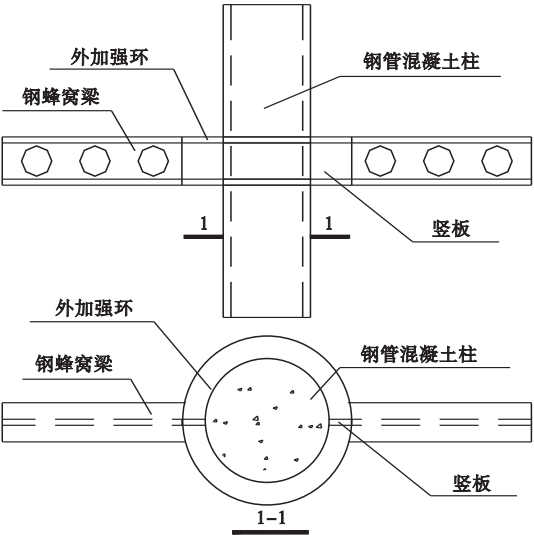


图 1 外加强环式圆钢管混凝土柱 – 钢蜂窝梁中柱节点构造示意图

Fig. 1 Structure schematic diagram of concrete filled circular steel tube-steel castellated beam interior joint with outer annular-stiffener

### 2 有限元模拟方法及验证

有限元软件采用 ABAQUS, 图 2 为有限元模型及荷载加载示意图。模拟有限元参数及单元设置: 采用软件自带的本构关系模型, 即弹塑性模型模拟钢蜂窝梁和钢管的材料本

表1 外加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁中柱节点参数

Table 1 Parameters for concrete filled circular steel tube-steel castellated beam interior joint with outer annular-stiffener

试件 编号	柱长/ mm	钢管壁 厚/mm	钢材屈服 强度/MPa	含钢率	轴压比	梁长/ mm	距离/ mm	孔半径/ mm	开孔 率	孔间距/ mm	环板宽 度/mm	梁柱线 刚度比
1	1 100	4	345	0.085	0.4	1 100	200	50	0.667	160	50	0.23
2	1 100	4	390	0.085	0.4	1 100	200	50	0.667	160	50	0.23
3	1 100	4	420	0.085	0.4	1 100	200	50	0.667	160	50	0.23
4	1 100	4	235	0.085	0.2	1 100	200	50	0.667	160	50	0.23
5	1 100	4	235	0.085	0.4	1 100	200	50	0.667	160	50	0.23
6	1 100	4	235	0.085	0.6	1 100	200	50	0.667	160	50	0.23
7	1 266	3	235	0.063	0.4	1 100	200	50	0.667	160	50	0.23
8	978	5	235	0.108	0.4	1 100	200	50	0.667	160	50	0.23
9	880	6	235	0.132	0.4	1 100	200	50	0.667	160	50	0.23
10	1 100	4	235	0.085	0.4	1 270	200	50	0.667	160	50	0.2
11	1 100	4	235	0.085	0.4	940	200	50	0.667	160	50	0.27
12	1 100	4	235	0.085	0.4	780	200	50	0.667	160	50	0.33
13	1 100	4	235	0.085	0.4	1 100	—	—	—	—	50	0.23
14	1 100	4	235	0.085	0.4	1 100	200	40	0.53	160	50	0.23
15	1 100	4	235	0.085	0.4	1 100	200	60	0.8	160	50	0.23
16	1 100	4	235	0.085	0.4	1 100	200	50	0.667	140	50	0.23
17	1 100	4	235	0.085	0.4	1 100	200	50	0.667	200	50	0.23
18	1 100	4	235	0.085	0.4	1 100	200	50	0.667	260	50	0.23
19	1 100	4	235	0.085	0.4	1 100	150	50	0.667	160	50	0.23
20	1 100	4	235	0.085	0.4	1 100	360	50	0.667	160	50	0.23
21	1 100	4	235	0.085	0.4	1 100	520	50	0.667	160	50	0.23
22	1 100	4	235	0.085	0.4	1 100	200	50	0.667	160	70	0.23
23	1 100	4	235	0.085	0.4	1 100	200	50	0.667	160	80	0.23
24	1 100	4	235	0.085	0.4	1 100	200	50	0.667	160	90	0.23

构关系,采用塑性损伤本构模型作为核心混凝土的材料本构关系模型;钢管和钢蜂窝梁建模采用壳单元(S4);柱顶加载板及钢管内混凝土建模采用实体单元(C3D8R);采用库仑摩擦模型模拟混凝土和钢管切线方向的接触,摩擦系数取 $0.6^{[17-18]}$ ,法线方向采用硬接触模拟;柱顶限制 $X$ 、 $Y$ 方向水平位移绕 $Z$ 轴的转动,柱底限制 $X$ 、 $Y$ 方向水平位移及 $Z$ 方向竖向位移和绕 $Z$ 轴的转动,在梁两端约束 $Y$ 方向位移;柱顶集中力转化为面荷载以避免应力集中;加载首先在柱顶施加轴向荷载 $N$ ,然后在梁两端施加反对称低周往复荷载 $F$ ,每次往复,保证位移最大值增量为节点屈服位移值 $\Delta y$ ;计算迭代方法为Newton-

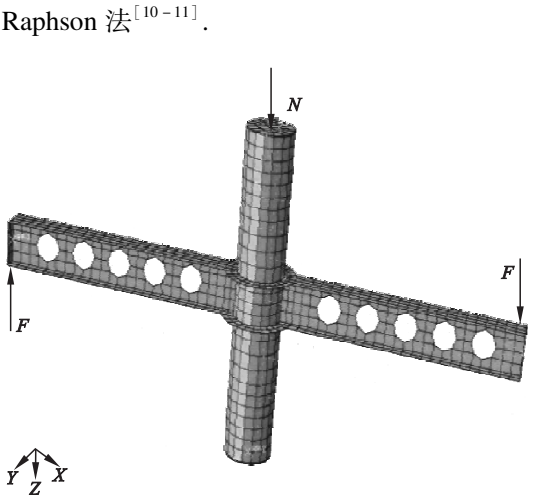


图2 有限元模型及荷载加载示意图

Fig. 2 Established finite element model and load applied schematic diagram

目前还未查到包含试验数据的外加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁节点的文献,为验证模拟方法,采用笔者设计的模拟条件和选取参数方法,模拟并提取已有的外加强环式圆钢管混凝土柱-实腹钢梁中柱和边柱节点<sup>[17-18]</sup>梁端加载点处的荷载-位移( $P-\Delta$ )骨架曲线,并与试验结果进行了对比(见图 3)

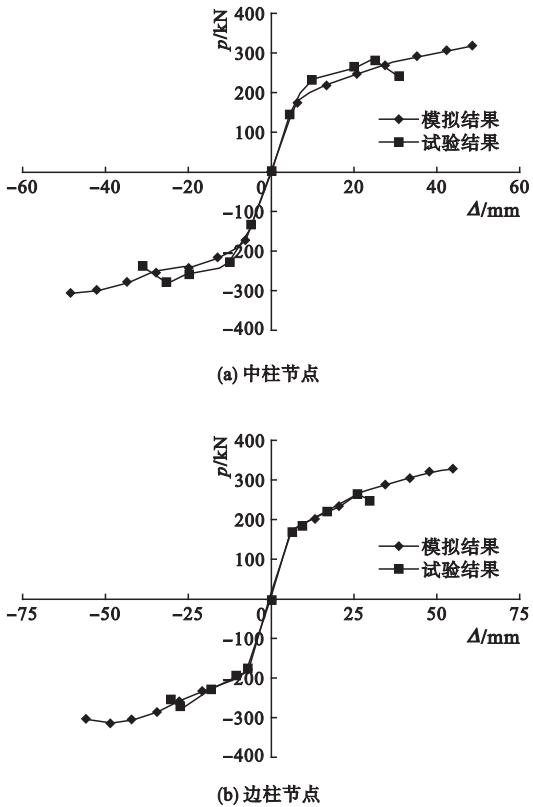


图 3 模拟与试验骨架曲线的对比

Fig. 3 Comparison between the skeleton curves from simulation and experiment

从图 3 中可看出,模拟与试验结果虽有一定偏差,但在趋势上比较接近.存在偏差的原因:①模拟与试验结果存在误差;②模拟时用的混凝土和钢材本构关系是根据试验测得的二者强度带入到已有的材料模型中;③模拟时焊缝假定对接,焊缝处不发生破坏,而实际试验节点在焊缝处出现了破坏,因此骨架曲线的较早出现了下降段<sup>[10-11]</sup>.说明该有限元模拟方法具有一定的可行性,可采用其进行研究分析.

3  $M-\theta$  骨架曲线的影响因素分析

在低周往复荷载作用下的  $M-\theta$  骨架曲线中,弯矩  $M$  为梁端弯矩,转角  $\theta$  为梁转角与柱转角的差值.

3.1 钢材屈服强度的影响

图 4、图 5 是试件 1、2、3、4 的  $M-\theta$  骨架曲线和初始刚度曲线,各试件的钢材屈服强度  $f_y$  分别为 235 MPa、345 MPa、390 MPa 和 420 MPa,其他参数不变(见表 1).

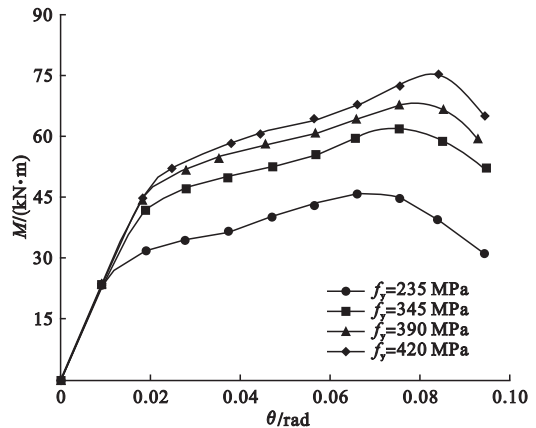


图 4 钢材屈服强度对  $M-\theta$  骨架曲线的影响

Fig. 4 Influence of steel yield strength on  $M-\theta$  skeleton curves

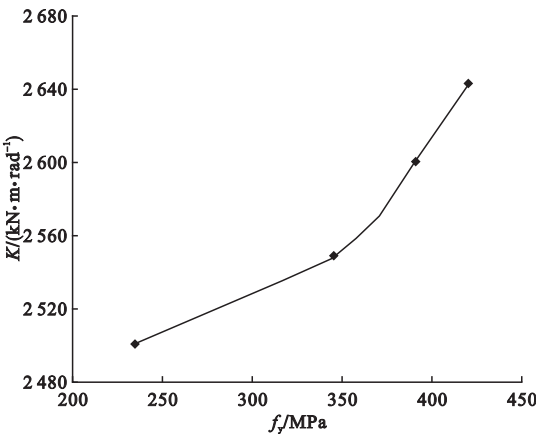


图 5 钢材屈服强度对初始刚度的影响

Fig. 5 Influence of steel yield strength on initial stiffness

从图 4、图 5 中可看出:钢材屈服强度对  $M-\theta$  骨架曲线影响很大,随钢材屈服强度增加,节点的抗弯承载力  $M_y$  (屈服荷载对应

的节点抗弯承载力)、极限抗弯承载力  $M_u$  (极限荷载对应的节点抗弯承载力) 和初始刚度  $K$ ( $0.2 M_u$  对应的割线刚度) 明显增加, 钢材屈服强度从 235 MPa 增加到 420 MPa, 三者分别增加 74%、63% 和 6%。这主要是因为钢材屈服强度增加, 钢管和钢蜂窝梁的屈服强度均相应增加, 因此在达到相同转角时, 节点的抗弯承载力和初始刚度均相应增加。说明钢材屈服强度是影响节点  $M-\theta$  骨架曲线的重要因素。

3.2 含钢率的影响

图 6、图 7 是试件 5、7、8、9 的  $M-\theta$  骨架曲线和初始刚度曲线, 各试件的含钢率  $\alpha$  分别为 0.085、0.063、0.108、0.132, 其他参数不变(见表 1)。

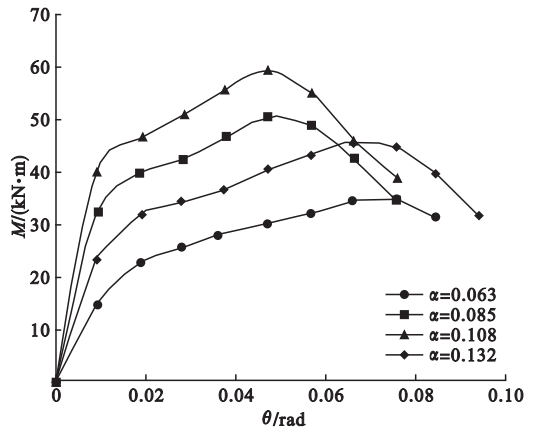


图 6 含钢率对  $M-\theta$  骨架曲线的影响

Fig. 6 Influence of steel ratio on skeleton curves of  $M-\theta$

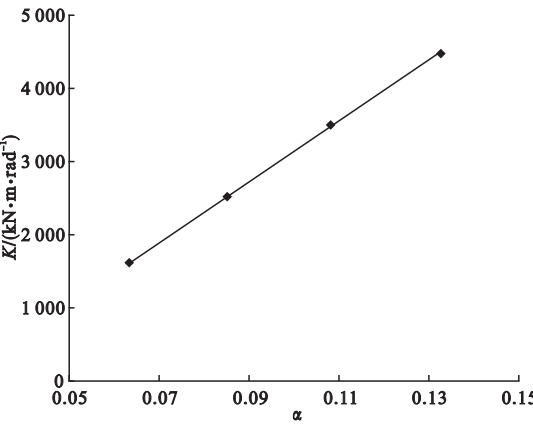


图 7 含钢率对初始刚度的影响

Fig. 7 Influence of steel ratio on initial stiffness

从图 6、图 7 中可看出: 含钢率对  $M-\theta$  骨架曲线影响很大, 在弹性阶段和非弹性上升阶段, 随含钢率的增加, 节点的抗弯承载力和初始刚度明显增大。含钢率从 0.063 增加至 0.132, 三者分别增加 82%、70% 和 178%。从骨架曲线的变化趋势可看出, 当含钢率增加到一定水平后, 骨架曲线会提前进入下降段, 即出现了  $M-\theta$  骨架曲线的交叉现象。这是因为含钢率越大, 钢管混凝土柱在弹性和非弹性上升段的抗弯承载力越大, 因此节点的抗弯承载力也越大; 而在骨架曲线的下降段, 含钢率高的节点, 其柱抗弯承载力也高, 柱进入屈服慢, 而梁端屈服相对较快, 因此导致节点的抗弯承载力下降快。说明含钢率是影响节点  $M-\theta$  骨架曲线的一个重要因素。

3.3 轴压比的影响

图 8、图 9 是试件 2、4、6 的  $M-\theta$  骨架曲线和初始刚度曲线, 各试件的轴压比  $n$  分别为 0.2、0.4、0.6, 其他参数不变(见表 1)。

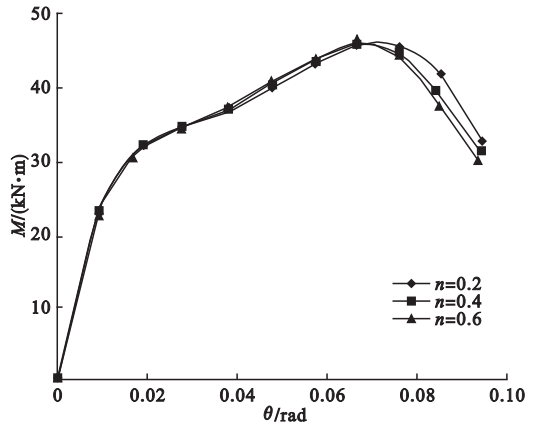


图 8 轴压比对  $M-\theta$  骨架曲线的影响

Fig. 8 Influence of axial compression ratio on skeleton curves of  $M-\theta$

从图 8、图 9 中可看出: 轴压比对  $M-\theta$  骨架曲线影响不大。在弹性和非弹性上升段, 轴压比从 0.2 变化到 0.6,  $M-\theta$  骨架曲线十分接近, 在非弹性下降段,  $M-\theta$  骨架曲线差别渐渐趋于明显, 但相差不大, 最大相差不足 10%, 节点初始刚度也有一定下降, 但下降程度很小, 不足 6%。这是由于轴压比增大时,

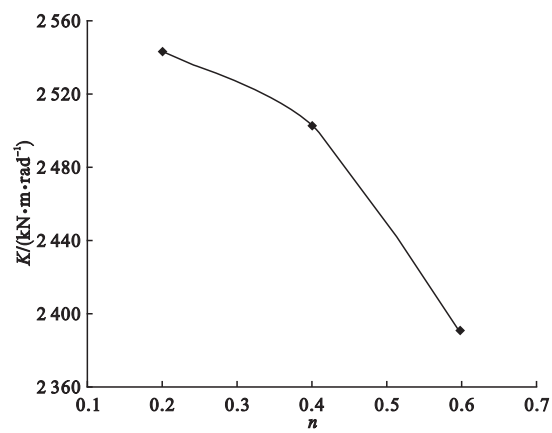


图 9 轴压比对初始刚度的影响

Fig. 9 Influence of axial compression ratio on skeleton curve of  $M-\theta$

核心混凝土受到的压应力增加,钢管对核心混凝土的约束作用变大,使其处于很高的三向受压状态.因此轴压比变化,对节点承载力和初始刚度的影响较小.说明轴压比对节点  $M-\theta$  骨架曲线影响较弱.

3.4 加强环板宽度的影响

图 10、图 11 是试件 4、22、23、24 的  $M-\theta$  骨架曲线和初始刚度曲线,各试件的环板宽度  $B$  分别为 50 mm、70 mm、80 mm、90 mm,其他参数不变(见表 1).

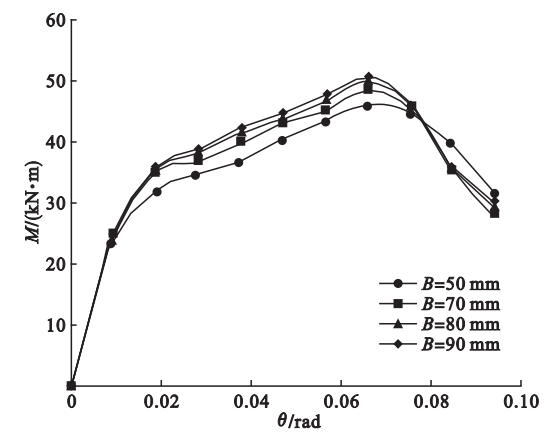


图 10 环板宽度对  $M-\theta$  骨架曲线的影响

Fig. 10 Influence of outer annular-stiffener width on skeleton curves of  $M-\theta$

从图 10、图 11 中可看出:加强环板宽度对  $M-\theta$  骨架曲线有一定影响,随外加强环板宽度的增加,节点的抗弯承载力、极限抗弯承载力和初始刚度均有一定程度的增加,外

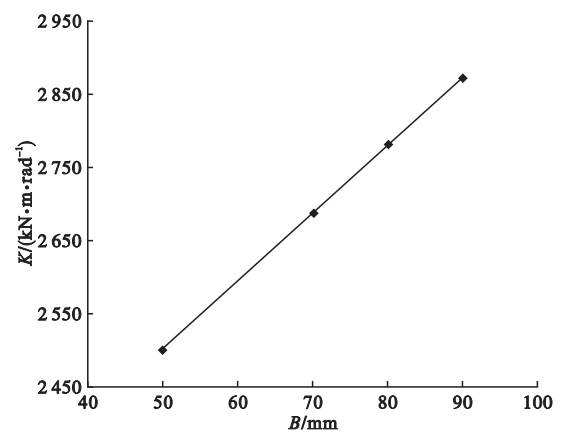


图 11 环板宽度对初始刚度的影响

Fig. 11 Influence of outer annular-stiffener width on initial stiffness

加强环板宽度从 50 mm 增加到 90 mm,三者分别约增加 14%、11% 和 15%.环板宽度增加引起的节点抗弯承载力、极限抗弯承载力和初始刚度增加幅度接近,并且不大,说明加强环板宽度对节点  $M-\theta$  骨架曲线的影响程度不强.

3.5 梁柱线刚度比的影响

图 12、图 13 是试件 4、10、11、12 的  $M-\theta$  骨架曲线和初始刚度曲线,各试件的梁柱线刚度比  $i$  分别为 0.23、0.2、0.27、0.33,其他参数不变(见表 1).

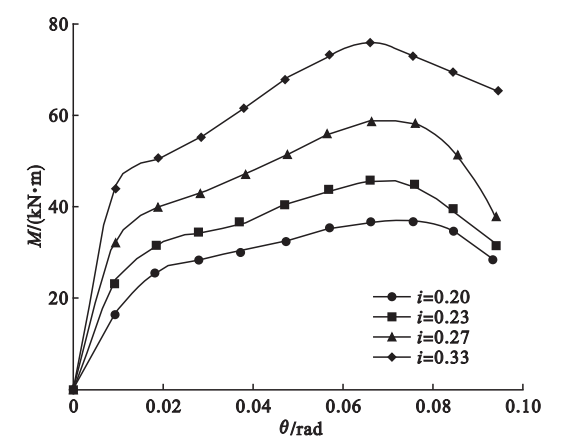


图 12 梁柱线刚度比对  $M-\theta$  骨架曲线的影响

Fig. 12 Influence of beam-column's linear stiffness ratio on skeleton curves of  $M-\theta$

从图 12、图 13 中可看出:梁柱线刚度比的变化对  $M-\theta$  骨架曲线影响很大,随梁柱



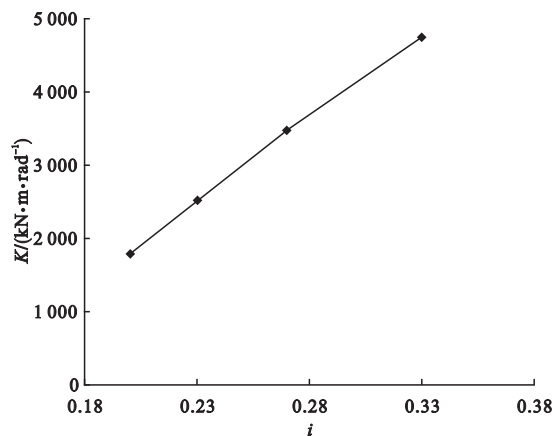


图13 梁柱线刚度比对初始刚度的影响

Fig. 13 Influence of beam-column's linear stiffness ratio on initial stiffness

线刚度比增加,节点的抗弯承载力、极限抗弯承载力和初始刚度明显增加,梁柱线刚度比从0.2增加到0.33,三者分别约增加85%、105%和161%。梁柱线刚度比的增加也会导致曲线早出现下降段,但不会出现曲线交叉现象。出现交叉现象的原因在于节点在设计时考虑使其满足“强柱弱梁”的屈服机制,即在低周反复荷载作用下,梁端先屈服。梁柱线刚度比增加,梁的刚度增加,因此梁端屈服减慢,从而整个节点的抗弯承载能力变大,但梁刚度的增加,会导致梁分配的弯矩增加,因此在骨架曲线中,下降段出现了较早出现的情况。说明梁柱线刚度比对节点  $M-\theta$  骨架曲线影响显著。

3.6 梁端第一个开孔到柱边距离的影响

图14、图15是试件4、19、20、21的  $M-\theta$  骨架曲线和初始刚度曲线,各试件的距离  $d$  分别为200 mm、150 mm、360 mm、520 mm,其他参数不变(见表1)。

从图14、图15中可看出:距离对  $M-\theta$  骨架曲线有一定影响,并且这种影响随转角 的增加而增大。随距离增加,节点的抗弯承载力、极限抗弯承载力和初始刚度增加,距离从150 mm 增加到520 mm,三者分别约增加3%、7%和3%。这是因为,位于中和轴附近的蜂窝梁孔洞对蜂窝梁弹性抗弯模量的削弱

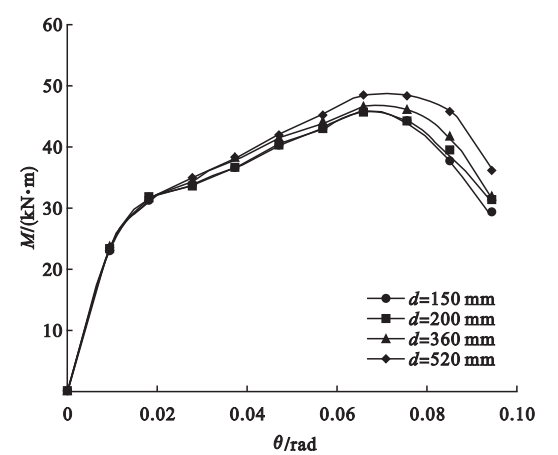


图14 距离对  $M-\theta$  骨架曲线的影响

Fig. 14 Influence of distance on skeleton curve of  $M-\theta$

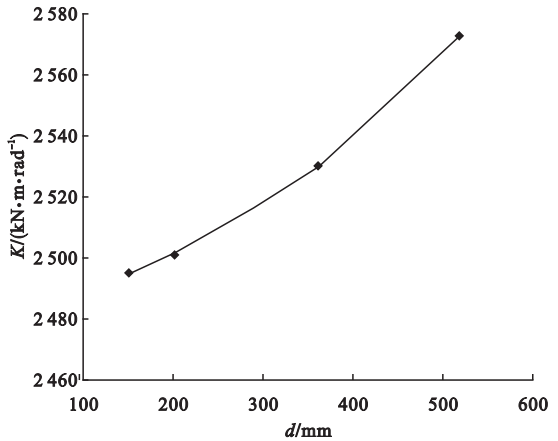


图15 距离对初始刚度的影响

Fig. 15 Influence of distance on initial stiffness

较小,而对其塑性抗弯模量的削弱较大,因此,距离越大,受削弱的截面离柱越远,节点抗弯承载力、极限抗弯承载力和初始刚度越高,且极限抗弯承载力的增加幅度高于抗弯承载力。由此说明,距离对节点  $M-\theta$  骨架曲线有一定影响,距离越小,节点中的梁越容易首先发生屈服,形成“强柱弱梁”的屈服机制。

3.7 开孔率的影响

图16、图17是试件4、13、14、15的  $M-\theta$  骨架曲线和初始刚度曲线,各试件的开孔率  $r$  变化,分别为0.66、0、0.53、和0.8,其他参数不变(见表1)。

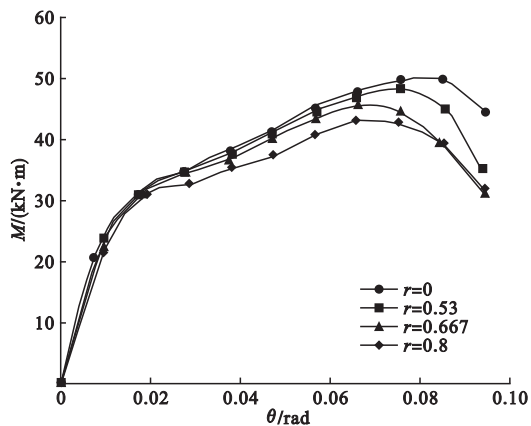


图 16 开孔率对  $M-\theta$  骨架曲线的影响

Fig. 16 Influence of opening rate on skeleton curve of  $M-\theta$

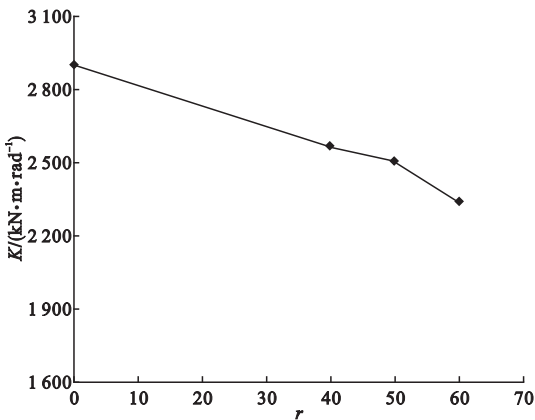


图 17 开孔率对初始刚度的影响

Fig. 17 Influence of opening rate on initial stiffness

从图 16、图 17 中可看出:开孔率对 $M-\theta$ 骨架曲线有一定影响,这种影响程度与距离的影响相似,即随转角的增加而增大,但增大程度较距离略明显.随开孔率的增加,节点的抗弯承载力、极限抗弯承载力和初始刚度降低,开孔率从 0 增加到 0.8,三者分别降低 4%、20% 和 3%.这主要是因为,开孔率越大,孔洞的面积越大,对开孔处腹板的削弱越大,这种削弱对梁截面弹性抗弯模量影响较小,但对梁截面塑性抗弯模量影响较大,因此,节点的骨架曲线表现为随开孔率的增加而降低,并且降低程度随转角的增加而增大.当开孔率无限小时,外加强环式圆钢管混凝土柱 – 钢蜂窝梁中柱节点变为外加强环式圆

钢管混凝土柱 – 实腹钢梁中柱节点,其抗弯承载力和初始刚度会进一步提高,这也是前者更容易实现“强柱弱梁”屈服机制的原因.说明开孔率对节点  $M-\theta$  骨架曲线有一定影响,开孔率越大,外加强环式圆钢管混凝土柱 – 钢蜂窝梁中柱节点中的梁越容易首先发生屈服,使“强柱弱梁”的屈服机制越容易出现.

3.8 孔间距的影响

图 18、图 19 是试件 4、16、17、18 的  $M-\theta$  骨架曲线和初始刚度曲线,各试件的孔间距  $l$  分别为 140 mm、160 mm、200 mm、260 mm,其他参数不变(见表 1).

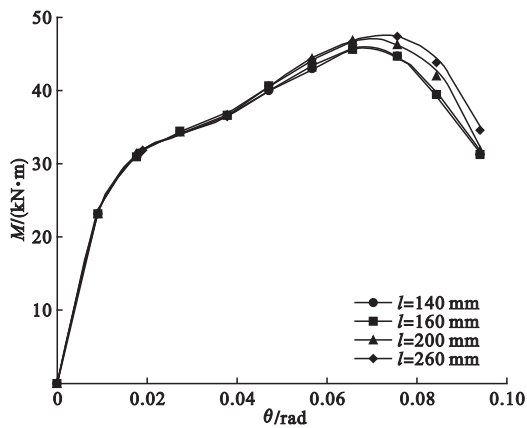


图 18 孔间距对  $M-\theta$  骨架曲线的影响

Fig. 18 Influence of the distance of adjacent holes on skeleton curve of  $M-\theta$

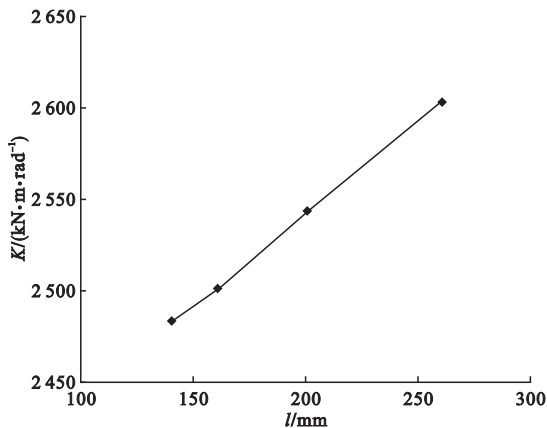


图 19 孔间距对初始刚度的影响

Fig. 19 Influence of the distance of adjacent holes on initial stiffness



从图 18、图 19 中可看出:孔间距对  $M-\theta$  骨架曲线有一定影响,这种影响程度与距离的影响程度相似,即随转角的增长而增大,但增大程度不如距离明显.随孔间距的增加,节点的抗弯承载力、极限抗弯承载力和初始刚度增加,孔间距从 140 mm 到 260 mm,三者分别约增加 2%、5% 和 3%.这主要是因为,孔间距越大,对整根梁腹板的削弱越小,这种削弱对蜂窝梁的塑性抗弯模量影响程度大于其对弹性抗弯模量的影响程度.因此,节点的骨架曲线表现为随孔间距的增加而增大,并且增加程度随转角的增长而增大.当孔间距无限小时,外加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁中柱节点变为外加强环式圆钢管混凝土柱-实腹钢梁中柱节点,承载力和初始刚度会进一步提高,这也是前者更容易实现“强柱弱梁”屈服机制的原因.说明孔间距对节点  $M-\theta$  骨架曲线有一定影响,并且孔间距越大,外加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁中柱节点中的梁越容易首先发生屈服,实现“强柱弱梁”屈服机制.

## 4 结 论

(1)外加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁中柱节点的  $M-\theta$  骨架曲线受钢材屈服强度、含钢率及梁柱线刚度比影响较大,随钢材屈服强度、含钢率及梁柱线刚度比增大,节点的抗弯承载力、极限抗弯承载力和初始刚度明显增大,但当含钢率和梁柱线刚度比增加到一定程度后,节点的  $M-\theta$  骨架曲线下降段会较早出现,且其中含钢率引起曲线的下降程度较大.

(2)外加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁中柱节点的  $M-\theta$  骨架曲线在弹性和非弹性上升段受轴压比影响很小,尤其是在弹性段受其影响更小,在下降段受轴压比对节点  $M-\theta$  骨架曲线有一定影响,但影响程度不大.加强环板宽度对外加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁中柱节点非弹性阶段抗弯

承载力有一定影响,随加强环板宽度的增大,节点的抗弯承载力、极限抗弯承载力和初始刚度增大,但增加幅度不大.

(3)距离、开孔率和孔间距对外加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁中柱节点的  $M-\theta$  骨架曲线均有一定的影响,总体表现为随距离和孔间距的增大或开孔率的减小,节点的抗弯承载力、极限抗弯承载力和初始刚度明显增加,并且增加的幅度与转角的大小有关,转角越大,增加的幅度越大,三者中,开孔率影响程度最大、距离次之、孔间距最小.这三个参数也是引起外加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁中柱节点比外加强环式圆钢管混凝土柱-实腹钢梁中柱节点更容易实现“强柱弱梁”屈服机制的重要因素.

## 参考文献

- [1] 周颖,于海燕,钱江,等.钢管混凝土叠合柱节点环梁试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(2):69-78.  
(ZHOU Ying, YU Haiyan, QIAN Jiang, et al. Experimental study on ring beams of joints of concrete filled steel tubular laminated columns [J]. Journal of building structures, 2015, 36(2):69-78.)
- [2] 吕学涛,杨华,张素梅.非均匀火灾作用下方钢管混凝土柱受力机理研究[J].建筑结构学报,2013,34(3):35-45.  
(Lü Xuetao, YANG Hua, ZHANG Sumei. Fire resistance behavior and mechanism of concrete-filled square hollow columns in non-uniform fires [J]. Journal of building structures, 2013, 34(3):35-45.)
- [3] 韩林海,宋天谕.钢-混凝土组合结构抗火设计原理[M].北京:科学出版社,2012.  
(HAN Linhai, SONG Tianyi. Fire safety design theory of steel-concrete composite structures [M]. Beijing: Science Press, 2012.)
- [4] LIU F Q, YANG H, LEROY G. Post-fire behaviour of eccentrically loaded reinforced concrete columns confined by circular steel tubes [J]. Journal of constructional steel research, 2016, 122(7):495-510.
- [5] ZHANG Z Q, YAN Y H, YANG H L. A simplified model of maximum cross-section flattening in continuous rotary straightening

- process of thin-walled circular steel tubes[J]. Journal of materials processing tech., 2016, 34(7): 305-314.
- [6] 贾连光,王哲,刘艳飞. 孔洞位置对蜂窝式梁柱节点破坏形式的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(5): 838-846. (JIA Lianguang, WANG Zhe, LIU Yanfei. Influences of hole position on the damage form of castellated beam column joints[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2015, 31(5): 838-846.)
- [7] 贾连光,李庆文,刘永方. 蜂窝梁抗剪性能分析与计算[J]. 工程力学, 2012, 29(增刊): 23-32. (JIA Lianguang, LI Qingwen, LIU Yongfang. Performance analysis and calculation of shear force resistance for cellular beam[J]. Engineering mechanics, 2012, 29(S): 23-32.)
- [8] 贾连光,杜明坎,回锋,等. 六边形孔蜂窝梁和蜂窝组合梁抗剪性能分析[J]. 工程力学, 2016, 33(1): 23-32. (JIA Lianguang, DU Mingkan, HUI Feng. Analysis of sheat behavior of hexagon hole cellular beam and cellular composite beam[J]. Engineering mechanics, 2016, 33(1): 23-32.)
- [9] POURBEHI P, PIRMOZ A. Shear response of castellated steel beams[J]. International journal of steel structures, 2015, 15(2): 389-399.
- [10] 李明,赵明,王元清,等. ATCFST-SCB 中柱节点的力学性能分析[J]. 特种结构, 2015, 32(6): 11-18. (LI Ming, ZHAO Ming, WANG Yuanqing, et al. Analysis of mechanical properties for ATCFST-SCB interior Joint[J]. Special structures, 2015, 32(6): 11-18.)
- [11] 李明,赵明,王元清,等. 节点  $P-\Delta$  骨架曲线影响因素分析[J]. 特种结构, 2016, 33(2): 25-33. (LI Ming, ZHAO Ming, WANG Yuanqing, et al. Influencing factors analysis on  $P-\Delta$  skeleton curves of ATCFST-SCB interior Joint[J]. Special structures, 2016, 33(2): 25-33.)
- [12] ELDIN A H M, MAHMOUD M H, ELDIN F T S. Behavior of a concrete-filled steel tube beam-column T-joint[J]. Proceedings of the institution of civil engineers: structures and buildings, 2011, 164(4): 229-238.
- [13] KIM I G, CHUNG C H, SHIM C S, et al. Stress concentration factors of N-joints of concrete-filled tubes subjected to axial loads[J]. International journal of steel structures, 2014, 14(1): 1-11.
- [14] KIDO M. Flexural strength of beam web to concrete filled circular steel tubular column joints[J]. Journal of structural and construction engineering, 2012, 77(673): 483-489.
- [15] LI M, LIU Y. Research on steel beam-column joints of concrete filled steel tube[J]. Mechanics and materials, 2012, 166: 43-47.
- [16] LI M, LIU Y, YUAN H. Force behavior of outer annular-stiffener type steel castellated beam-concrete filled steel tuber[J]. Applied mechanics and materials, 2013, 405/408: 861-864.
- [17] 李幅昌,孙巍. 钢管煤矸石混凝土梁柱加强环中节点低周往复荷载试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 24(2): 200-203. (LI Guochang, SUN Wei. Experiment on middle joints of gangue concrete-gilled steel tubes with ring stiffeners under reversed low cyclic loads[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 24(2): 200-203.)
- [18] 姜杰. 钢管煤矸石混凝土梁柱节点在低周往复荷载作用下的有限元分析[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011. (JIANG Jie. Nonlinear FEM analysis on mechanical behavior of joint of gangue concrete filled steel tubular column-steel beam under reversed low cyclic loads[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011.)
- [19] 王文达,秦庚,张鹏鹏. 钢管混凝土柱-钢梁外环板节点抗弯承载力计算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(4): 29-34. (WANG Wenda, QIN Geng, ZHANG Pengpeng. Design approach on flexural load-carrying capacity of steel beam to CFST column joints with external stiffening Ring[J]. Journal of civil, architectural & environmental engineering, 2011, 33(4): 29-34.)
- [20] 黄兴,石文龙,叶志明. 梁柱连接组合节点弯矩-转角关系研究[J]. 建筑钢结构进展, 2010, 12(2): 13-22. (HUANG Xing, SHI Wenlong, YE Zhiming. Moment-rotation relation research on beam-to-column composite joints[J]. Progress in steel building structures, 2010, 12(2): 13-22.)