

内加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁 节点抗震性能研究

李明,周稚竣,吴潜,李志伟,刘岗

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究内加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁节点的抗震性能,为工程应用提供参考。**方法** 采用 ABAQUS 软件建立节点模型,对比其与内加强环式圆钢管混凝土柱-钢实腹梁的抗震性能,分析不同因素对节点抗震性能的影响。**结果** 与内加强环式圆钢管混凝土柱-钢实腹梁相比,两者抗震性能相近;梁柱线刚度比和钢材牌号对抗震性能影响较大,但梁柱线刚度比对节点的承载力和耗能能力影响最大,最大相差分别为 169.3% 和 29%,钢材牌号对节点的延性影响最大,最大相差 41.2%;含钢率、内加强环宽度和厚度对抗震性能影响不大,但对延性、耗能能力、屈服和极限位移影响较明显。**结论** 内加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁节点具有可行性,符合“强柱弱梁”的抗震设计要求。

关键词 钢管混凝土柱;钢蜂窝梁;抗震性能;有限元;节点

中图分类号 TU398.1 文献标志码 A

Seismic Performance of Concrete Filled Circular Steel Tube-steel Honeycomb Beam Joint with Internal Reinforcement Ring

LI Ming, ZHOU Zhijun, WU Qian, LI Zhiwei, LIU Gang

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: To study the seismic performance of concrete filled circular steel tube-steel honeycomb beam joint with internal reinforcement ring (CFST-HBN), and provide reference for engineering application, such a model was established by Software ABAQUS. Its' seismic performance was compared with that of concrete filled circular steel tube-steel solid web beam joint (CFST-SBN). Different effect factors on its' seismic performance was analyzed. Compared with CFST-SBN, the seismic performance of the two is similar. The beam-column linear stiffness and the grade of steel have large influence on its' seismic performance, but the former has the greater influence on the bearing capacity and the energy dissipation capacity, of which the maximum difference is 169.3%

收稿日期:2022-07-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51978422);辽宁省教育厅科研项目(LJKZ0561)

作者简介:李明(1979—),男,副教授,博士,主要从事钢结构、组合结构等方面研究。

and 29% , respectively. And the latter has the greater influence on the ductility, of which the maximum difference is 41. 2% . The steel ratio ,the width and the thickness of the inner stiffening ring have small influence on its' seismic performance, but they have obvious effects on its' ductility, energy dissipation capacity, yield and ultimate displacement, respectively. It can be concluded that the CFST-HBN is practicable and can meet the seismic design performance of “strong conlumn and weak beam” .

Key words: concrete filled circular steel tube; steel honeycomb beam; seismic performance; finite element; joint

钢管混凝土柱是在钢管内填充混凝土形成的竖向受力构件,具有抗震性能好、施工工期短、经济效益高等优点,在工程中得到了广泛应用^[1-2]。钢蜂窝梁是将工字型钢按照一定的折线切割,再错位焊接而成的空腹梁^[3],具有便于管线穿越、自重轻,抗弯性能好等优点,在工程中也得到了广泛应用^[4-5]。钢管混凝土柱和钢蜂窝梁均是结构中较合理的受力构件,若将二者同时应用于结构中,如何实现二者间可靠的连接成为决定结构性能的关键。国内学者对此开展了一定研究。刘勇^[6]、袁赫^[7]利用 ABAQUS 有限元软件分别对外加强环式圆(方)钢管混凝土柱-钢蜂窝梁节点的抗震性能进行了研究,通过与同条件钢实腹梁节点的抗震性能对比,探讨了各节点可行性,分析了各节点受力性能的主要影响因素,并建立了各节点初始刚度、屈服弯矩及极限弯矩的简化计算式。郑博等^[8]利用 ABAQUS 有限元软件对内加强环式方钢管混凝土柱-钢蜂窝梁节点的力学性能进行了研究,通过与同条件钢实腹梁节点的力学性能对比,探讨了其可行性。

笔者将继续开展上述系列研究,采用 ABAQUS 有限元软件研究内加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁节点(CFST-HBN)的抗震性能,探讨了节点的可行性,分析影响该种节点抗震性能的主要因素,为钢管混凝土柱与钢蜂窝梁的连接设计提供更多参考。

1 CFST-HBN 结构

CFST-HBN 结构图 1 所示,首先在钢蜂

窝梁上下翼缘对应的钢管内部设置加强环,然后将钢蜂窝梁焊接于钢管外壁。梁端剪力、弯矩分别由钢蜂窝梁的腹板和翼缘通过焊缝传递至圆钢管混凝土柱。内加强环可有效防止钢管局部屈曲。该节点具有用钢量少、刚度大、方便管线布置等优点。

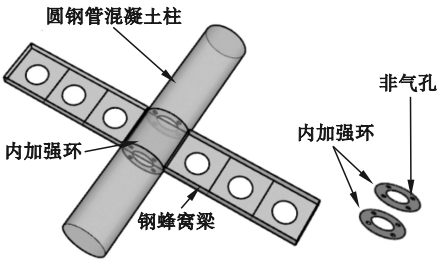


图 1 内加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁节点

Fig. 1 Concrete filled circular steel tube-steel honeycomb beam joint with internal reinforcement rings

2 有限元模型

由于未开展 CFST-HBN 试验,模拟前,选用了文献[9]中的内加强环式圆钢管混凝土柱-钢实腹梁节点试验和文献[10]中的内加强环式方钢管混凝土柱-钢实腹梁节点试验对有限元模拟方法进行验证。两个试验试件尺寸分别如图 2、图 3 所示。

采用 ABAQUS 有限元软件建模:混凝土采用 C3D8R 实体单元;钢材采用 S4R 壳单元;混凝土采用塑性损伤模型^[11-13];钢材采用三折线模型;材料参数均与试验相同;边界条件、加载方式均与试验相近,即柱顶端和底部均约束 x 、 y 、 z 方向位移和 z 方向转动,梁两端约束 x 方向位移;在柱顶端施加轴向荷

载,梁两端通过位移控制施加低周往复荷载;柱上下端设置加载板,防止局部破坏;采用 Newdon-rapson 方法求解。

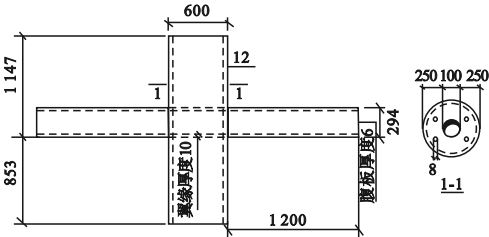


图2 文献[9]中试验试件尺寸

Fig.2 Test specimen size in reference [9]

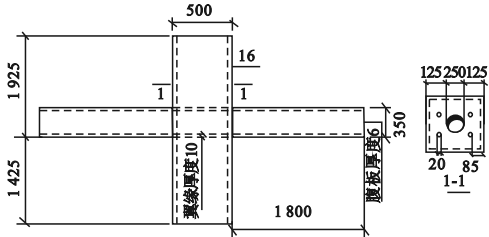


图3 文献[10]中试验试件尺寸

Fig.3 Test specimen size in reference [10]

笔者采用上述有限元建模方法对文献 [9]和文献[10]中试件的受力过程进行模拟,将模拟结果与文献的试验结果进行对比,分别如图4和图5所示。从图4可看出,在试验曲线范围内,模拟值与试验荷载-位移骨架曲线较为一致,相同位移时,模拟值与试验荷载最大相差未超过8%。从图5可看出,模拟值与试验的荷载-位移骨架曲线较为一致,位移相同时,模拟值与试验荷载最大

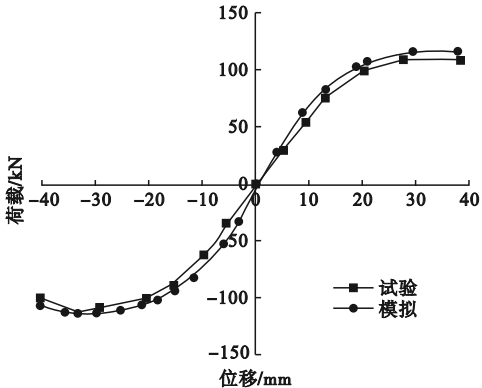


图5 模拟值与文献[10]的试验结果对比

Fig.5 Comparison of simulation and test results for the specimen in reference [10]

相差未超过10%。由此说明,笔者建立的有限元模拟方法具有较高精度,满足要求。

3 可行性分析

3.1 试件设计

为探讨 CFST-HBN 的可行性,设计该种节点试件(编号为 SCB),模拟其受力过程,并与相同条件下的内加强环式圆钢管混凝土柱-钢实腹梁节点(编号为 XJF)进行抗震性能对比。试件 SCB 的尺寸见图6,其中,混凝土型号为 C40,钢材牌号为 Q345。模拟时,在柱顶施加轴压比为0.5的轴压力。试件 SCB 模型及网格划分见图7。

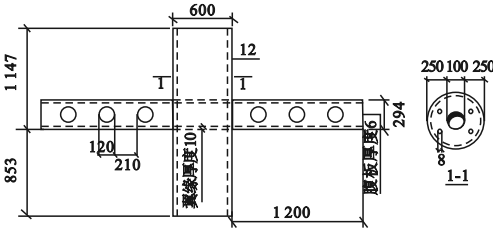


图6 试件 SCB 的尺寸

Fig.6 Size of specimen SCB

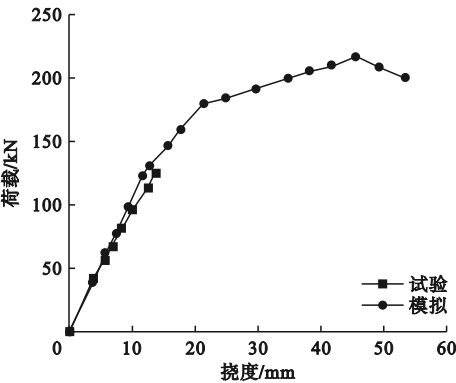


图4 模拟值与文献[9]中试验结果对比

Fig.4 Comparison of simulation and test results for the specimen in reference [9]

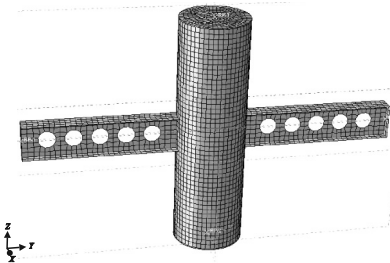


图7 试件 SCB 模型及网格划分

Fig.7 Model and meshing of specimen SCB

3.2 滞回曲线对比

试件 SCB 与试件 XJF 滞回曲线对比如图 8 所示。从图 8 可看出,各试件滞回曲线均较为饱满,塑性变形能力较强,随位移增加,试件 SCB 的刚度退化略快于试件 XJF,主要原因是钢蜂窝梁的开孔削弱了梁的抗弯性能,但总体相差较小。由此表明,试件 SCB 具有良好的耗能能力。

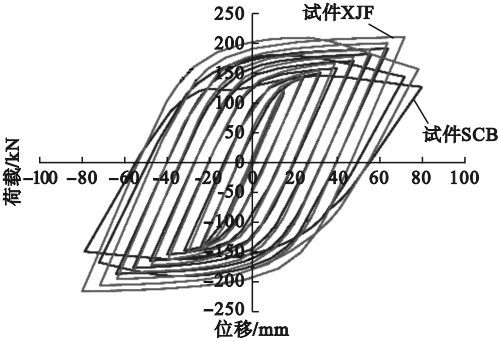


图 8 试件 SCB 和试件 XJF 滞回曲线对比
Fig. 8 Comparison of hysteresis curves between specimen SCB and specimen XJF

3.3 荷载-位移骨架曲线对比

试件 SCB 与试件 XJF 的荷载-位移骨架曲线对比如图 9 所示。

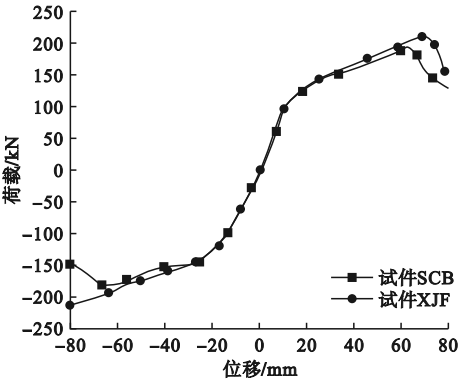


图 9 试件 SCB 与试件 XJF 荷载-位移骨架曲线对比
Fig. 9 Comparison of load-displacement skeleton curves between specimen SCB and specimen XJF

从图 9 可看出,在加载初期,两者的刚度、位移和承载力几乎一致;随荷载增加,试件 SCB 的承载力有所降低,蜂窝孔洞在一定程度上削弱了梁的承载力,位移相同时承载力降低幅度小于 10%,由此说明,试件 SCB

节点可较快进入塑性状态,符合“强柱弱梁”的抗震设计要求。

3.4 延性对比

试件 SCB 和试件 XJF 延性系数分别为 3.1、3.3。与试件 XJF 相比,试件 SCB 延性系数降低了 6.06%,钢蜂窝梁中蜂窝孔洞的存在,使钢蜂窝梁较钢实腹梁更早地进入塑性阶段。由此说明,CFST-HBN 在具有良好延性的同时,更容易形成“强柱弱梁”的屈服机制。

4 抗震性能影响因素分析

为分析不同因素对 CFST-HBN 抗震性能的影响,设计了 23 个试件。孔半径为 75 mm、孔间距为 220 mm、轴压比为 0.5、混凝土强度为 C40 和孔壁距离为 210 mm,这 5 个参数不变,为常数;变化因素包括内加强环宽度 B 、厚度 t 、柱截面含钢率 a 、钢材牌号 Q 、梁柱线刚度比 i 。编号规则为 $SB\alpha Qi$, S080100852350286 含义为内加强环宽度为 80 mm、厚度为 10 mm、柱截面含钢率为 0.085、钢材牌号为 Q235、梁柱线刚度比为 0.0286,试件编组如表 1 所示。各试件的特征值计算结果见表 2。图 10 为荷载-位移曲线的特征值定义图, P_e 为比例极限荷载; P_y 为屈服荷载; P_{max} 为峰值荷载; P_u 为极限荷载; Δ_e 、 Δ_y 、 Δ_u 为 P_e 、 P_y 、 P_u 对应位移。

4.1 内加强环宽度的影响

图 11 为其他参数不变,内加强环宽度分别为 80 mm、100 mm、120 mm 时,各试件的荷载-位移骨架曲线(由于第 1、3 象限骨架曲线相近,因此仅给出了第 1 象限)。

从图 11 和表 2 中可看出,各试件的荷载-位移骨架曲线趋势差别较大,表现为随内加强环宽度增加,峰值荷载降低,且峰值和屈服荷载点出现明显提前。当内加强环宽度从 80 mm 增加至 120 mm 时,试件屈服荷载提高 3.5%,峰值荷载和极限荷载均降低 5.2%,屈服位移和极限位移分别降低

表 1 试件列表

Table 1 List of specimens

试件编号	B/mm	t/mm	a	钢材牌号 Q	i
S080100853450286	80	10	0.085	Q345	0.028 6
S100100853450286	100	10	0.085	Q345	0.028 6
S120100853450286	120	10	0.085	Q345	0.028 6
S100080853450286	100	08	0.085	Q345	0.028 6
S100100853450286	100	10	0.085	Q345	0.028 6
S100120853450286	100	12	0.085	Q345	0.028 6
S100140853450286	100	14	0.085	Q345	0.028 6
S100100563450286	100	10	0.056	Q345	0.028 6
S100100853450286	100	10	0.085	Q345	0.028 6
S100101163450286	100	10	0.116	Q345	0.028 6
S100101483450286	100	10	0.148	Q345	0.028 6
S100100852350286	100	10	0.085	Q235	0.028 6
S100100853450286	100	10	0.085	Q345	0.028 6
S100100853900286	100	10	0.085	Q390	0.028 6
S100100854200286	100	10	0.085	Q420	0.028 6
S100100853450200	100	10	0.085	Q345	0.0200
S100100853450286	100	10	0.085	Q345	0.028 6
S100100853450400	100	10	0.085	Q345	0.040 0
S100100853450600	100	10	0.085	Q345	0.060 0

表 2 各试件特征值对比

Table 2 Comparison of eigenvalues of specimens

试件编号	屈服荷载 P_y/kN	峰值荷载 P_{\max}/kN	极限荷载 P_u/kN	屈服位移 Δ_y/mm	极限位移 Δ_u/mm	位移延性 系数	能量耗散 系数	等效黏滞 阻尼系数
S080100853450286	115	155	132	22	59	2.7	2.07	0.33
S100100853450286	120	155	132	19	53	2.7	2.07	0.33
S120100853450286	119	147	125	17	50	2.9	1.89	0.30
S100080853450286	114	150	127	19	51	2.7	1.97	0.31
S100100853450286	120	155	131	19	53	2.7	2.07	0.33
S100120853450286	118	147	125	18	54	3.0	2.13	0.34
S100140853450286	120	148	126	17	52	3.0	1.91	0.30
S100100563450286	118	155	131	22	61	2.8	2.16	0.34
S100100853450286	120	155	131	19	53	2.7	2.07	0.33
S100101163450286	119	147	125	17	49	2.9	1.96	0.31
S100101483450286	116	143	122	18	45	2.5	1.81	0.29
S100100853450286	85	120	102	15	53	3.5	2.45	0.39
S100100853450286	120	155	131	19	53	2.7	2.07	0.33
S100100853900286	131	166	141	21	52	2.5	1.94	0.31
S100100854200286	138	169	144	21	57	2.7	1.44	0.23
S100100853450200	88	117	100	36	94	2.6	1.95	0.31
S100100853450286	120	155	131	19	53	2.7	2.07	0.33
S100100853450400	142	182	155	11	31	2.9	1.90	0.30
S100100853450600	237	273	232	9	20	2.2	2.51	0.40

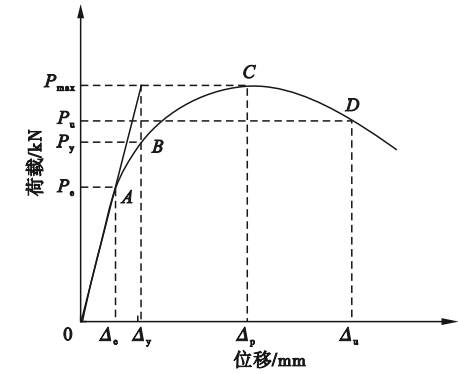


图 10 荷载-位移曲线上特征值定义
Fig. 10 Definition of eigenvalue on load-displacement curve

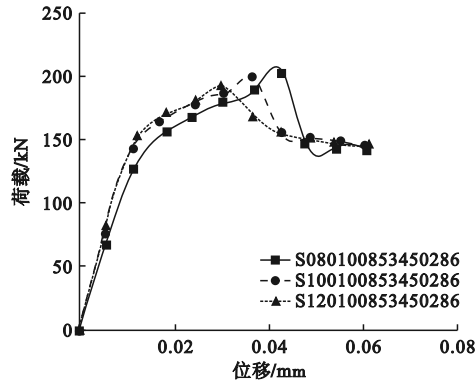


图 11 不同内加强环宽度下节点的荷载-位移骨架曲线
Fig. 11 Load-displacement skeleton curves of joints with different width of internal reinforcement ring

22.7%、15.3%，位移延性系数提高 7.4%，试件能量耗散系数和等效黏滞阻尼系数分别降低 8.7%、9.1%。由此说明，增加内加强环宽度，仅可小幅提高 CFST-HBN 的屈服荷载和延性，但同时会使节点较早出现屈服和达到峰值荷载，引起节点承载力及耗能能力的小幅降低。由于内加强环式梁柱节点柱直径远大于梁尺寸，节点破坏位置主要发生于梁端，内加强环宽度增加使梁端约束加强，从而引起梁更早地进入屈服。

4.2 内加强环厚度的影响

图 12 为其他参数不变，内加强环厚度分别为 8 mm、10 mm、12 mm 和 14 mm 时，各试件的荷载-位移骨架曲线。

从图 12 和表 2 可看出，各试件的荷载-位移曲线趋势较为一致。当内加强环厚度从 8 mm 增加至 14 mm 时，试件屈服荷载、峰值荷载和极限荷载分别提高 5.3%、1.3%、1%，试件屈服位移降低 10.5%，极限位移提高 2.0%，位移延性系数提高 11.1%，试件能量耗散系数和等效黏滞阻尼系数分别降低 3.0%、3.2%。可见，内加强环厚度增加，仅可小幅提高 CFST-HBN 的承载力及延性，但同时会使节点较早地出现屈服，引起节点耗能能力降低。出现上述现象的原因与内加强环宽度变化相似。

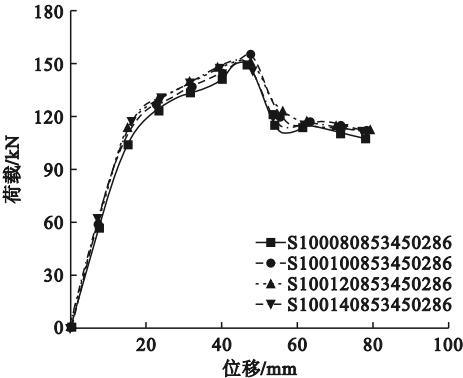


图 12 不同内加强环厚度下节点的荷载-位移骨架曲线
Fig. 12 Load-displacement skeleton curves of joints with different thickness of internal reinforcement ring

4.3 含钢率的影响

图 13 为其他参数不变，含钢率分别为 0.056、0.085、0.116 和 0.148 时，各试件的荷载-位移骨架曲线。

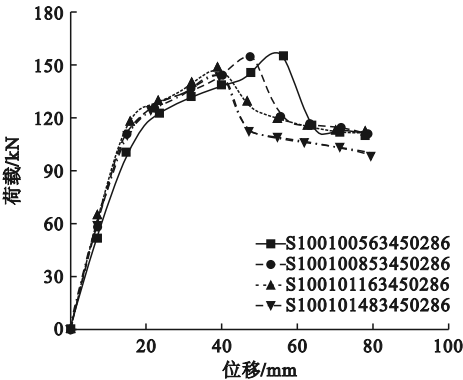


图 13 不同含钢率下荷载-位移骨架曲线
Fig. 13 Load-displacement skeleton curves of joints with different steel ratio

从图 13 和表 3 可看出,各试件的荷载-位移骨架曲线差别较大,表现为随含钢率增加,峰值荷载降低,且峰值和屈服荷载点出现明显提前。当含钢率从 0.056 增加至 0.148 时,试件屈服荷载、峰值荷载及极限荷载分别降低 1.7%、7.7%、6.9%,试件屈服位移和极限位移分别降低 18.1% 和 19.7%,位移延性系数降低 10.7%,试件能量耗散系数和等效黏滞阻尼系数分别降低 16.2%、12.1%。由此说明,含钢率的增加总体降低了 CFST-HBN 的抗震性能。出现上述现象原因与内加强环宽度变化相似。

4.4 钢材牌号的影响

图 14 为其他参数不变,钢材牌号分别为 Q235、Q345、Q390 和 Q420 时,各试件的荷载-位移骨架曲线。

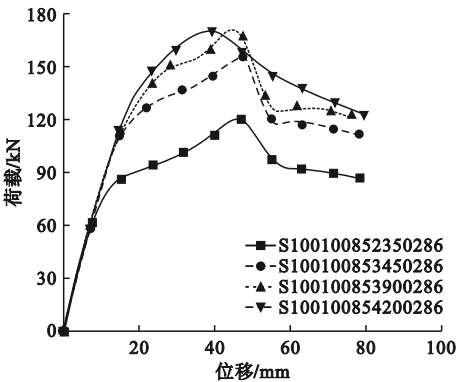


图 14 不同钢材牌号下荷载-位移骨架曲线
Fig. 14 Load-displacement skeleton curves of joints with different standard grade of steel

从图 14 和表 2 可看出,各试件的荷载-位移曲线差别很大。当钢材牌号从 Q235 增大至 Q420 时,试件屈服荷载、峰值荷载及极限荷载分别提高 62.4%、40.8%、41.2%,试件屈服位移和极限位移分别提高 40.0% 和 7.5%,位移延性系数提高 37.0%,试件能量耗散系数和等效黏滞阻尼系数分别降低 41.2%、41.0%。由此说明,随钢材牌号增大,CFST-HBN 的承载力及延性明显提高,但耗能能力明显降低。因为节点破坏主要发生于梁端,所以提高钢材牌号,节点的承载力和

延性明显提高;而屈服强度提高后,相同荷载作用节点的位移减小,因此节点的耗能能力反而明显降低。

4.5 梁柱线刚度比的影响

图 15 为其他参数不变,梁柱线刚度比分别为 0.02、0.0286、0.04 和 0.06 时,各试件的荷载-位移曲线。

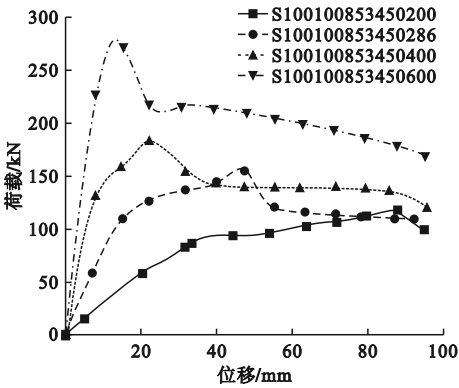


图 15 不同梁柱线刚度比下荷载-位移骨架曲线
Fig. 15 Load-displacement skeleton curves of joints with different beam-column linear stiffness ratio

从图 15 和表 2 可看出,各试件的荷载-位移曲线差别很大。当梁柱线刚度比从 0.02 增加至 0.06 时,试件屈服荷载、峰值荷载及极限荷载分别提高 169.3%、133.3%、132.0%,试件屈服位移和极限位移分别降低 75.0% 和 78.7%,位移延性系数降低 15.4%,试件能量耗散系数和等效黏滞阻尼系数分别提高 28.7%、29.0%。由此说明,随梁柱线刚度比增加,CFST-HBN 的承载力、耗能能力均提高,但延性降低。因为梁柱线刚度比增加后,梁的刚度增加,破坏向柱转移,相同荷载节点位移更大,所以节点的承载力增加,耗能能力提高,但因破坏区域减小,节点延性反而降低。

5 结 论

(1)内加强环式圆钢管混凝土柱-钢蜂窝梁节点与内加强环式圆钢管混凝土-实腹梁节点具有相近的抗震性能,且由于梁设置了圆孔,钢蜂窝梁能更早进入塑性阶段,更有

利于形成“强柱弱梁”的屈服机制,具有可行性。

(2) 随内加强环宽度增加,其屈服和极限位移明显降低;随内加强环厚度增大,其屈服位移明显减小;随含钢率增大,其延性和耗能能力明显降低;上述参数对节点抗震性能影响很小。

(3) 钢材强度和梁柱线刚度比对 CFST-HBN 的抗震性能影响较大:随钢材牌号增大,节点的承载力和延性明显增大;随梁柱线刚度比的增加,节点承载力和耗能能力明显提高。

参考文献

- [1] 华正茂. 椭圆钢管混凝土桥梁墩柱抗震性能与地震易损性分析[D]. 合肥:合肥工业大学,2022.
(HUA Zhengmao. Seismic performance and seismic vulnerability analysis of elliptic concrete-filled steel tubular bridge piers [D]. Hefei:Hefei University of Technology,2022.)
- [2] LE T T, ASTERIS P G, LEMONIS M E. Prediction of axial load capacity of rect-angular concrete-filled steel tube columns using machine learning techniques [J]. Engineering with computers,2021(38):1-34.
- [3] 贾连光,赵轶彤,李显超,等. 蜂窝组合梁钢框架抗震性能分析[J]. 工业建筑,2018,48(5):144-150.
(JIA Lianguang, ZHAO Yitong, LI Xianchao, et al. Analysis of seismic behavior of steel frame with cellular composite beam [J]. Industrial construction,2018,48(5):144-150.)
- [4] 白凤军,马克俭. 蜂窝梁的静力分析[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版),2002(6):32-35.
(BAI Fengjun, MA Kejian. Static analysis of honeycomb beam [J]. Journal of Guizhou university of technology (natural science edition),2002(6):32-35.)
- [5] 贾连光,杜嘉慧,毕然,等. 正六边形孔蜂窝组合梁腹板纯弯屈曲研究[J]. 钢结构(中英文),2022,37(2):1-12.
(JIA Lianguang, DU Jiahui, BI Ran, et al. Study on pure flexural buckling behavior of web of castellated composite beams with regular hexagonal hole [J]. Steel construction (chinese & english),2022,37(2):1-12.)
- [6] 刘勇. 圆钢管混凝土柱-蜂窝梁节点抗震性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2014.
(LIU Yong. Seismic performance research on concrete filled steel-tube column-steel castell-

- ated beam joint [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2014.)
- [7] 袁赫. 方钢管混凝土柱-蜂窝梁节点抗震性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2015.
(YUAN He. Study on seismic performance of concrete filled square steel tube column-steel castellated beam joint [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2015.)
- [8] 郑博,李明,张沛楠. 内加强环式方钢管混凝土柱-钢蜂窝梁中柱节点的力学性能分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(13):5262-5268.
(ZHENG Bo, LI Ming, ZHANG Peinan. Analysis of mechanical properties of inner annular-stiffener type concrete filled square steel tube-steel castellated beam interior joint [J]. Science technology and engineering, 2020, 20(13):5262-5268.)
- [9] 王磊. 内加强环式钢管混凝土节点内环焊缝研究及节点改进[D]. 广州:华南理工大学,2012.
(WANG Lei. Research on the behavior of the weld on the joint of CFST column with interior strengthening ring and the joint improvements [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2012.)
- [10] 周天华. 方钢管混凝土柱-钢梁框架节点抗震性能及承载力研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2004.
(ZHOU Tianhua. Study on seismic behavior and load-carrying capacity of concrete-filled square tubular column to steel beam connection [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2004.)
- [11] 崔钦淑,倪振强. 基于 ABAQUS 软件的 RC Z 形柱框架节点仿真分析[J]. 浙江工业大学学报,2016,44(2):212-215.
(CUI Qinsu, NI Zhenqiang. ABAQUS-based modeling analysis for the frame joints of RC Z-shaped columns [J]. Journal of Zhejiang university of technology,2016,44(2):212-215.)
- [12] 王静峰,盛鸣宇,沈奇罕,等. 圆端形椭圆钢管混凝土构件受剪性能分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(1):81-87.
(WANG Jingfeng, SHENG Yiming, SHEN Qihan, et al. Investigation on shear behavior of round-ended elliptical concrete-filled steel tubular members [J]. Journal of hefei university of technology (natural science), 2020,43(1):81-87.)
- [13] 王庆华,樊则森,孙占琦,等. 预应力带肋叠合板力学性能试验研究[J]. 施工技术,2020,49(8):9-12.
(WANG Qinghua, FAN Zesen, SUN Zhanqi, et al. Experimental research on mechanical properties of prestressed ribbed composite slabs [J]. Construction technology, 2020, 49(8):9-12.)

(责任编辑:王国业 英文审校:刘永军)