

贯穿式方钢管混凝土-H型钢梁柱节点 抗震性能分析

阎石¹,吴禹墨¹,陈鑫¹,綦宝晖²,刘福学²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168; 2. 鞍钢建设集团建筑研究所,辽宁 鞍山 114001)

摘要 目的 分析不同参数对贯穿式方钢管混凝土-H型钢梁节点的抗震性能的影响. 方法 采用 ABABQUS 软件对不同参数的该类节点分别进行单调加载及往复加载,并与试验结果进行对比,研究轴压比、钢管壁厚度、隔板厚度及外伸长度等参数对该类节点受力性能的影响规律. 结果 塑性铰一般出现在梁端且与隔板的外伸尺寸密切相关,“滞回环”很饱满. 通过对比分析,笔者建议节点轴压比应小于 0.4,隔板的外伸长度取值范围 60~100 mm,隔板厚度取 8~10 mm. 结论 节点的抗震性能的增强是随着隔板外伸长度的增加而增加的,虽然隔板厚度对组合节点的抗震性有一定程度的影响,但作用效果不明显. 轴压比越大,位移延性和承载力下降越快. 另一方面随着钢管壁厚度的增加节点的耗能也在不断增加.

关键词 方钢管混凝土;贯穿式梁柱节点;有限元分析;抗震性能

中图分类号 TU398 文献标志码 A

Seismic Performance Analysis for Joints of Clapboard-through-type Concrete-filled Square Steel Tube Column and H-shaped Steel Beam

YAN Shi¹, WU Yumo¹, CHEN Xin¹, QI Baohui², LIU Fuxue²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Building Research Institute, Angang Construction Group, Anshan, China, 114001)

Abstract: The seismic performance analysis was conducted on the joints of clapboard-through-type concrete-filled square steel tube column and H-shaped steel beam to investigate the influence of overhang length of the diaphragm, thickness of the diaphragm, thickness of the steel tube, and axial load ratio. Nonlinear finite element model was used to analyze the seismic performance and failure mode of the connection with different parameters under the monotonic loading and the cyclic loading using ABAQUS, respectively. The numerical results show that the kind of joint has better bearing capacity and seismic ductility, the plastic hinge depended on the overhang length of the dia-

收稿日期:2015-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51278313);辽宁省自然科学基金项目(2015020595);鞍钢建设集团2011年科研项目

作者简介:阎石(1962—),男,教授,博士研究生导师,主要从事结构工程抗震研究.

phragm is always generated at the end of the beam, and the area of hysteretic loop is much greater. We can conclude that as increasing the diaphragm overhang length, the seismic performance of the joint can be gradually enhanced. The diaphragm thickness has a certain influence on the seismic performance with unobvious effect. The bearing capacity and the displacement ductility of the joint obviously decrease with the increase of the axial load ratio, and the energy consumption capacity increase with change of the thickness of the steel tube.

Key words: square concrete-filled steel tube; clapboard-through-type joint of beam and column; finite element analysis; seismic performance.

随着高层、超高层结构的广泛应用及铁路站房日益大型化、立体化,方钢管混凝土作为竖向承重构件具有承载力高、抗震性能好、防火和抗火能力强、外形美观等优点,在实际的工程应用中获得了越来越多的关注. 框架梁柱节点抗震性能无疑是方钢管混凝土结构设计的重要内容之一,研究成果较为丰富^[1-6]. 另外,国内外学者们对外隔板和内隔板的节点的研究相对比较多^[7-11],但针对隔板贯穿式的节点研究相对很少. Mastui 等^[12]对方钢管混凝土柱-翼缘钢梁组合节点进行过分析,提出了强度计算公式; Fujimoto 等^[13]对内隔板和外隔板节点进行低周往复试验,得到了高强度混凝土节点的承载力计算公式较保守的结论; 杜国锋等^[14]采用 ABAQUS6.5 对内隔板外伸式节点进行了参数化有限元分析,并提出了优化意见; 庄磊^[15]在试验数据基础上对内隔板式节点和贯穿式节点进行了非线性有限元分析,有限元分析的滞回

曲线以及骨架曲线与试验曲线吻合.

笔者在已有研究的基础上,主要针对贯穿式方钢管混凝土-H型钢梁柱节点进行研究,采用 ABABQUS 软件对不同参数的该类节点分别进行单调加载及往复加载,对轴压比、钢管壁厚度、隔板厚度及外伸长度等参数对节点的承载力、延性、耗能等受力性能的影响规律进行分析,为该类节点的抗震设计提供计算参数.

1 有限元分析模型

1.1 试件选取

文献[16-17]已经完成了6个模型试件(编号为 JD1~JD6)的试验研究,笔者在模型试验的基础上,有限元分析对象增加 JD7~JD10 四组试件. 试件隔板和钢管的钢材材料取用 Q345B, 钢梁和拼接板取用 Q235B, 取用强度等级为 C30 钢管内混凝土, M18 摩擦型高强螺栓作为试件螺栓. 试件参数见表 1.

表 1 节点参数

Table 1 Geometric parameters of joints

编号	截面长 × 宽 × 高 × 厚度/mm	隔板厚度/mm	隔板外伸长度/mm	轴压比	梁长/mm
JD-1	300 × 300 × 3 000 × 6	16	25	0.56	900
JD-2	300 × 300 × 3 000 × 6	10	25	0.56	900
JD-3	300 × 300 × 3 000 × 6	16	60	0.56	900
JD-4	300 × 300 × 3 000 × 6	10	60	0.56	900
JD-5	300 × 300 × 3 000 × 6	16	100	0.56	900
JD-6	300 × 300 × 3 000 × 6	10	100	0.56	900
JD-7	300 × 300 × 3 000 × 8	16	100	0.56	900
JD-8	300 × 300 × 3 000 × 10	16	100	0.56	900
JD-9	300 × 300 × 3 000 × 6	16	100	0.3	900
JD-10	300 × 300 × 3 000 × 6	16	100	0.4	900

1.2 本构关系的选择和单元划分

根据试件的尺寸,在 ABAQUS 中建立节

点有限元模型. 理想弹塑性模型作为钢材的应力-应变关系,简化得到且满足 Von Mi-

ses 屈服准则. 因为核心区混凝土必然受钢管的约束, 存在塑性变化, 而且单轴加载试验难以测定. 韩林海教授^[20]提出的混凝土本构模型比较符合混凝土的实际情况, 但是不适合有限元计算分析, 需要对其进行修正简化. 因此, 笔者采用修正后的韩林海本构关系模型(见图1).

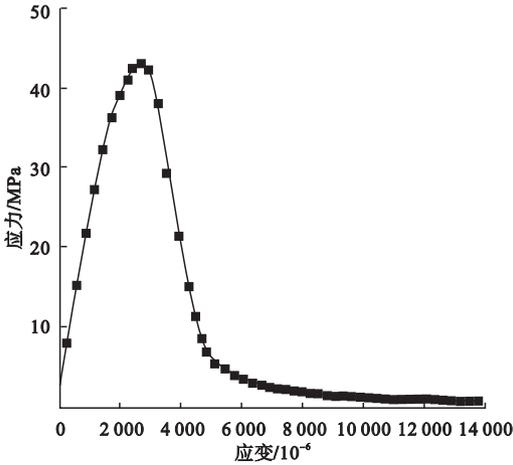


图1 混凝土本构模型

Fig. 1 The constitutive model of concrete

模型的建立采用实体与壳体相结合的方式, 八节点缩减积分三维实体单元 C3D8R 用于模拟钢管核心区混凝土, 四节点完全积分壳单元 S4 被应用于钢管、钢梁、隔板. 为满足计算精度, 于壳厚度方向上设定 9 个 Simpson 积分点, 网格划分的方法设定为映射自定义. 此外, 模拟钢管混凝土的力学性能关键问题之一是钢管与核心混凝土间的接触问题, 法线方向接触为硬接触, 而切线方向设为摩擦系数为 0.6.

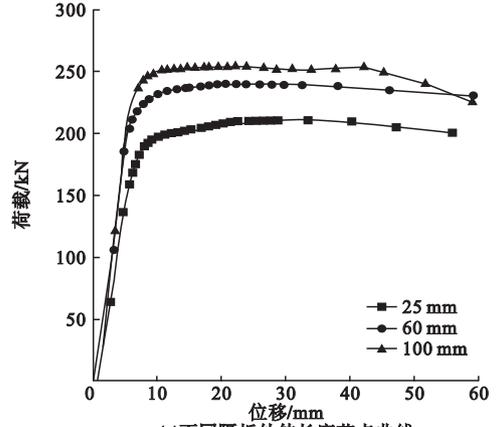
1.3 加载和求解

建立模型时在柱子底部施加的位移约束为 X、Y、Z 三个方向, 在梁端施加一定的 Y 向约束以防梁端平面外局部失稳的发生; 将柱顶耦合于一点再施加 Z 向竖直向下的集中力, 此后在梁端施加单调荷载或往复荷载. 另外, 按照施工实际顺序对螺栓施加预紧力. 在进行非线性求解时采用 Newton - Raphson 平衡迭代法, 由于计算时间较长, 为了提高非线性求解效率采取自动增量步长法.

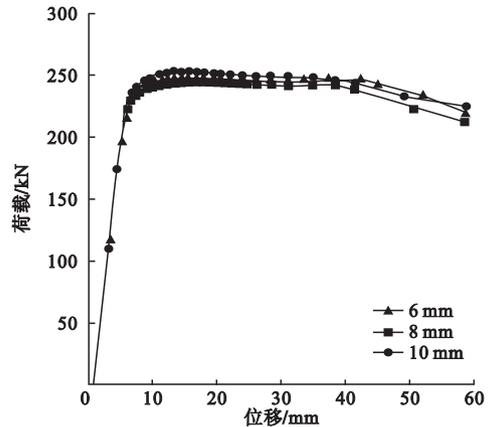
2 单调加载非线性有限元分析

2.1 荷载位移曲线

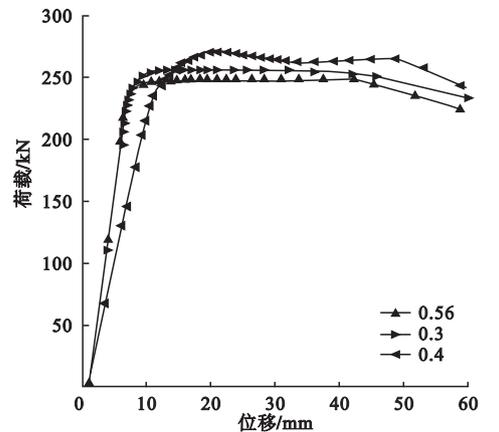
按照上述方法, 得到在单调增加荷载作用下的梁端荷载 - 位移 ($P - \Delta$) 曲线, 如图 2 所示.



(a)不同隔板外伸长度节点曲线



(b)不同钢管壁厚度的节点曲线



(c)不同轴压比节点曲线

图2 单调加载作用下 $P - \Delta$ 曲线

Fig. 2 Monotonic loading $P - \Delta$ curves

因为各组试件的柱刚度远大于梁刚度,所以组合节点最终破坏形态均为梁端破坏(见图3).在节点的梁端部位置上形成完善的塑性铰且均完全屈服,大部分的钢材进入强化阶段,梁端发生明显的局部屈曲.钢梁与拼接板的连接处均发生了一定的挤压变形,同时螺栓未发生剪切破坏.节点破坏形态与相应的试验结果完全一致,间接证明了数值分析的正确性.

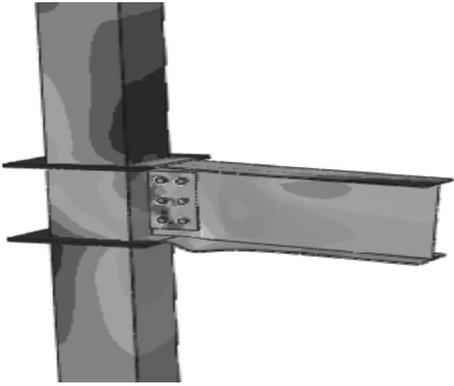


图3 试件破坏形态

Fig. 3 Failure mode of specimen

2.2 计算结果分析

由荷载-位移曲线对比可知,组合节点梁端承载力一定程度上受到隔板的外伸长度的影响,且作用效果随着尺寸的增加而增大,节点的厚度改变时,其承载力的变化并不明显;但随着轴压比值变大,节点的位移延性开始下降,轴力产生的二阶效应明显;当轴压比值大于0.5时,节点如果屈服, $P-\Delta$ 曲线很快进入下降段,轴压比越大下降越显著;钢管

壁厚度的增加使节点的极限承载力有所提高,并且当位移达到40 mm左右,承载力均开始下降.各组试件的极限位移、屈服位移、极限荷载和屈服荷载见表2.

表2 有限元模拟的单调承载力和位移

Table 2 Bearing capacity and displacement of monotonous load in FEA

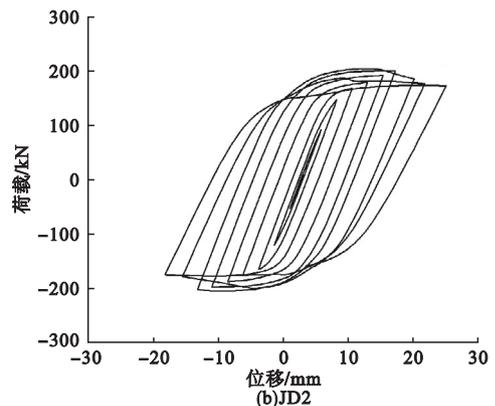
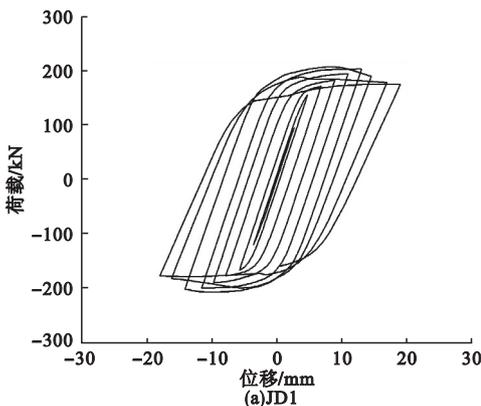
编号	屈服位移/mm	屈服荷载/kN	极限位移/mm	极限荷载/kN
JD-1	4.3	130	16.3	214
JD-2	4.4	132	17.6	213
JD-3	4.8	171	18.5	237
JD-4	4.8	166	16.3	225
JD-5	5.1	181	19.0	258
JD-6	5.0	174	17.8	235
JD-7	4.9	175	18.6	255
JD-8	5.0	202	17.2	269
JD-9	5.3	212	19.5	267
JD-10	6.4	220	22.4	277

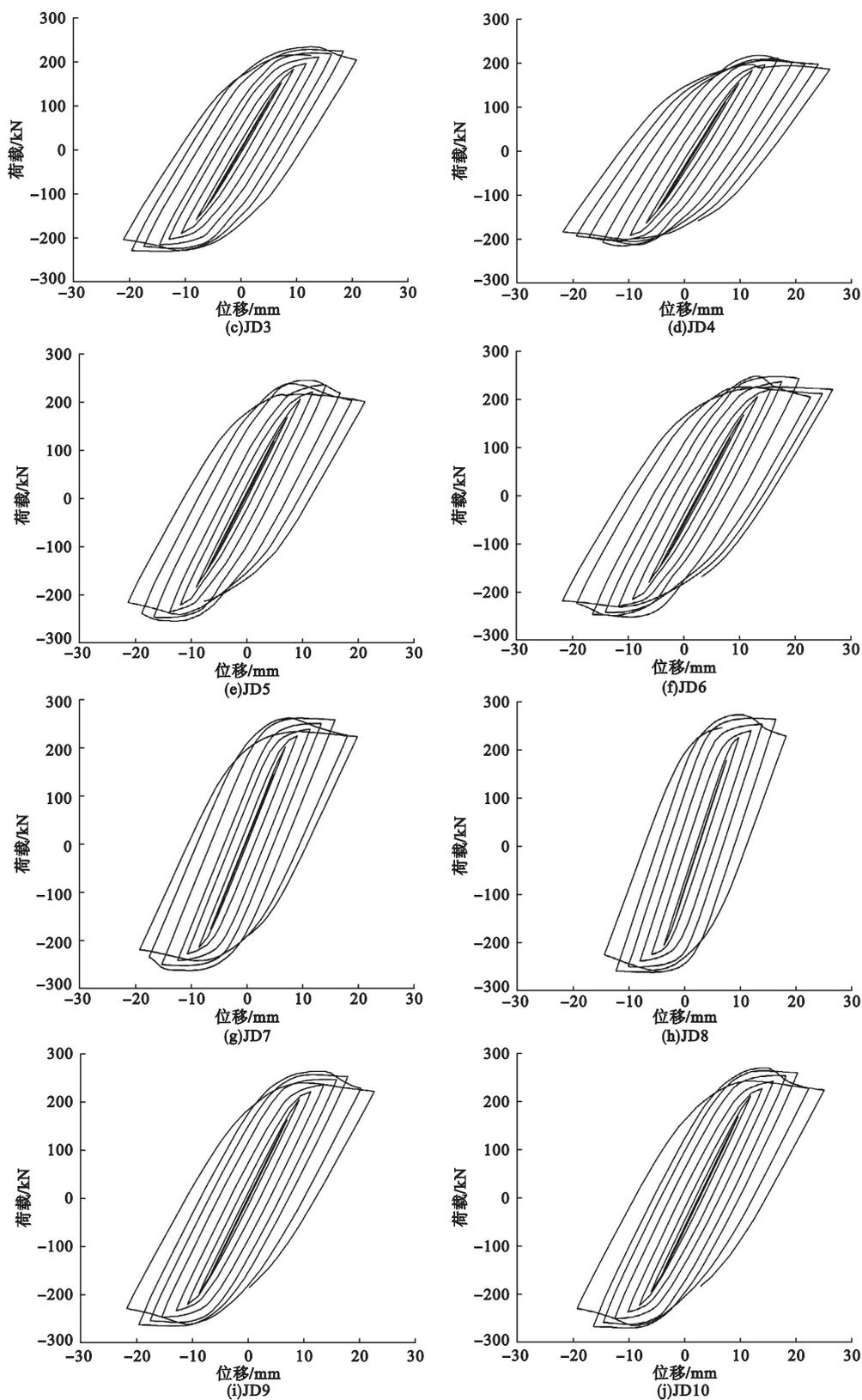
3 循环加载非线性有限元分析

3.1 滞回曲线

在循环荷载的作用下,各个模型的梁端滞回曲线如图4所示.

当对所有节点进行滞回曲线分析时,取梁端加载位移中心点作为参考点^[13].曲线前两个阶段线性变化,加载和卸载过程中刚度基本一致;加载到第8个阶段后,强度开始下降,节点达到破坏,但曲线的滞回圈仍在不断增加,随着梁端位移的增加,节点刚度减小,表现出一定的刚度退化现象.强度也有不明显的退化现象发生.



图4 循环加载作用下节点 $P-\Delta$ 曲线Fig. 4 $P-\Delta$ curves of joints under cyclic loading

3.2 节点的耗能性能分析

利用能量等效的方法,确定等效黏滞系数和能量耗散系数(见表3).各组节点都具有良好的耗能,由于滞回曲线形成的梭形均非常饱满.笔者利用位移延性系数、转角延性系数、等效黏滞系数、能量耗散系数分析节点耗能能力和延性^[14].

表3 节点延性及耗能指标

Table 3 Ductility and energy consumption indication of joints

编号	位移延性系数	转角延性系数	等效黏滞系数	能量耗散系数
JD-1	3.50	3.49	2.26	0.36
JD-3	3.72	3.70	2.51	0.39
JD-5	3.98	3.97	2.58	0.41
JD-2	3.37	3.35	2.20	0.35
JD-4	3.56	3.54	2.41	0.38
JD-6	3.77	3.75	2.56	0.40
JD-7	4.01	4.03	2.68	0.42
JD-8	4.03	4.04	2.74	0.43
JD-9	4.21	4.39	2.63	0.41
JD-10	4.48	4.46	2.73	0.44

从表3中可看出,延性系数在3.37到4.48之间,均大于约定系数2,可见达到了位移延性标准.文献[18-19]规定,对于多层和高层钢结构弹性层位移角一般取为0.02,可以看出本次模拟的10组节点均满足抗震设计要求.由规范可知等效黏滞阻尼系数大约0.1的一般为钢筋混凝土节点,型钢混凝土节点大约为0.4,从表3可知贯穿式方钢管混凝土组合节点的耗能系数为钢筋混凝土的3到4倍接近型钢混凝土节点.

另外,保持其他参数不变,只增大贯穿隔板的外伸长度,节点的延性系数、等效黏滞系数、能量耗散系数均有不同程度的增加.隔板外伸长度不变,隔板厚度增大使得节点延性和耗能均略有增加;其他参数不变,随着轴压比值的提高,组合节点耗能能力下降显著;保持其他参数不变,增加钢管壁厚度,其耗能能力明显提高且延性性能受到的影响较为显

著,随着管壁厚度的增加而增加.

4 主要影响参数分析

笔者以隔板外伸长度、隔板厚度、轴压比、钢管壁厚度为主要影响参数,通过ABAQUS有限元软件研究节点的滞回曲线和骨架曲线变化规律,从而确定其对抗震性能的影响.在进行参数分析时,仅改变一个参数,并保持其他参数不变.

4.1 滞回曲线的对比

组合节点的一个重要的抗震性能指标是滞回曲线,如果把试验曲线和有限元曲线做对比,便可验证有限元计算是否具有准确性.部分试件的对比结果如图5(a)、(b)和(c)所示.从图中可以看出,试验曲线与有限元分析曲线具有很高的吻合度,虽然存在一定的误差,但在一定程度上反映出有限元方法的可行性,可以在一定的程度上代替复杂的试验,得到既经济又省时的效果.

从图5(d)也可以看出,有限元模拟节点的变形位置与破坏形式和试验试件基本相同,进一步证明了ABAQUS模拟结果的可靠性以及有限元分析的可行性.

4.2 隔板外伸长度和厚度影响

保持其他参数不变,仅改变方钢管混凝土节点的贯穿隔板的外伸长度,取值分别为25 mm、60 mm和100 mm,节点骨架曲线如图6所示.从图中可以看出,随着增大隔板外伸长度,组合节点的刚度与承载力增加显著,以JD-1、JD-3和JD-5为例,在其他参数不变的情况下,JD-5的承载力比JD-3和JD-1分别提高了15%和20%,JD-5刚度则比JD-3和JD-1提高了12%、17%.

同理,保持其他参数不变,仅改变隔板厚度,得到节点骨架曲线如图7所示.可以看出,隔板厚度值的增大对组合节点的承载力及刚度影响不大.由此可见,从经济的角度出发,隔板的外伸长度宜控制在60~100 mm,隔板厚度可取10 mm左右比较合适.

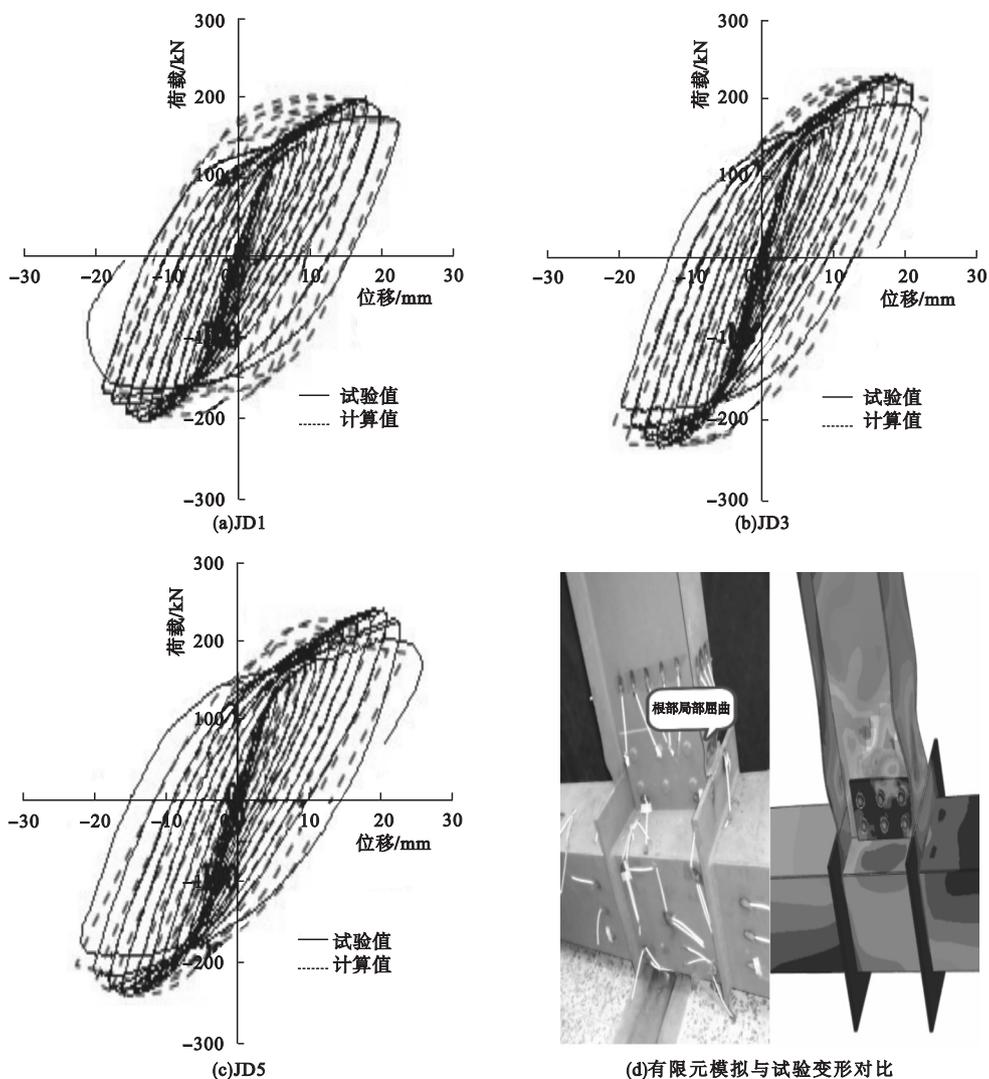


图5 部分试件有限元与文献[17]对比图

Fig. 5 The partial comparison of test [17] and FEA

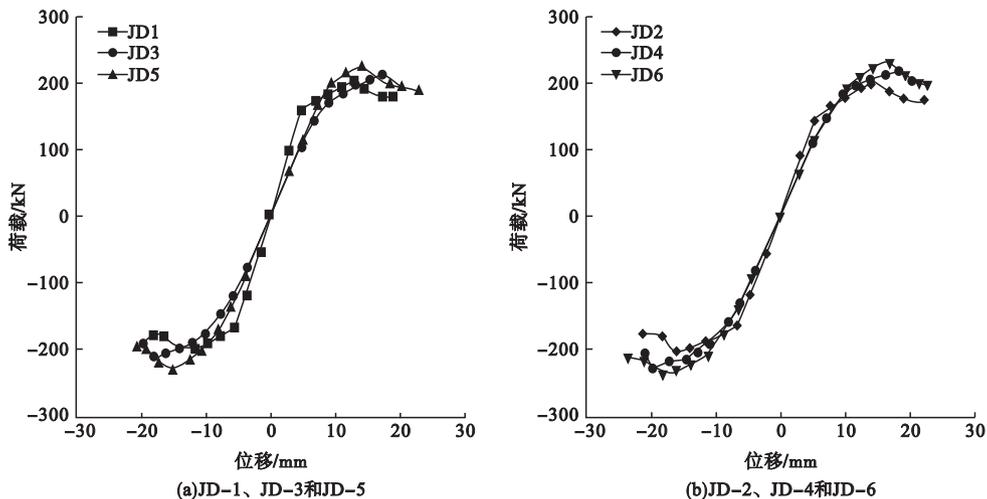
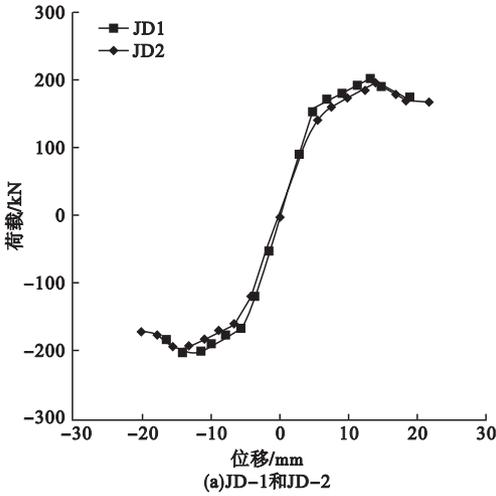
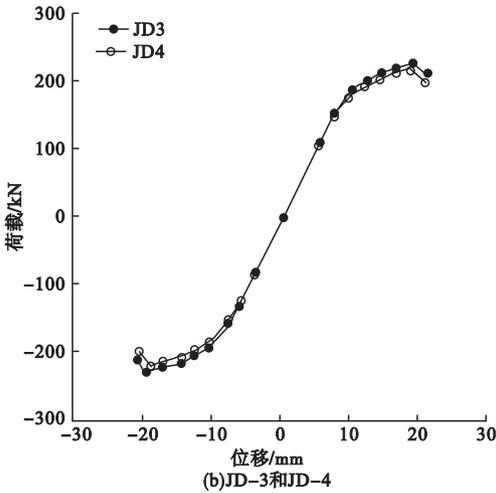


图6 不同隔板外伸长度的节点骨架曲线

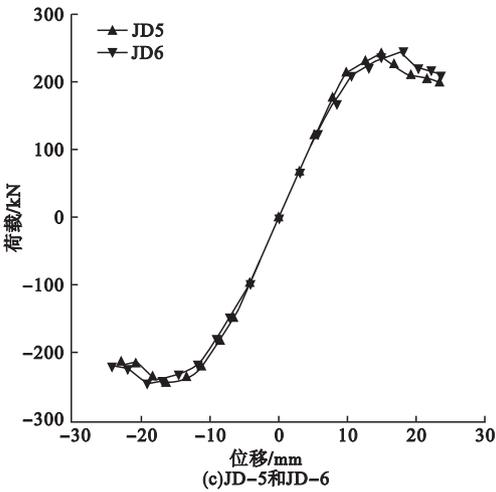
Fig. 6 Joint skeleton curves for different diaphragm overhang lengths



(a)JD-1和JD-2



(b)JD-3和JD-4



(c)JD-5和JD-6

图7 不同隔板厚度的节点骨架曲线

Fig.7 Joint skeleton curves for different diaphragm thickness

4.3 钢管壁厚度影响

保持其他参数不变,如果只增加方钢管

混凝土节点的钢管壁厚度,取值分别为 6 mm、8 mm 和 10 mm,计算结果如图 8 所示.从图中可见,若增大钢管壁厚度,节点的承载力和刚度的变化趋势均不断增大,梁端屈曲的位置也随钢管壁厚度增加而远离节点域;在梁的端部先形成塑性铰是节点破坏的主要模式,因此滞回曲线所形成的梭形十分理想,说明节点的耗能能力非常好;钢管壁厚度的增加,使得塑性铰位置略有外移,故当钢管壁厚度较大时,节点的抗震性能提高,在结构优化时从性能、经济、施工等多个方面考虑,建议钢管厚度取 8 ~ 10 mm.

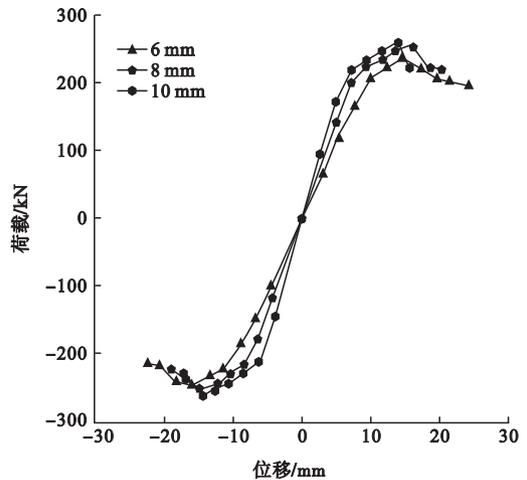


图8 不同钢管壁厚度的节点骨架曲线

Fig.8 Joint skeleton curves for different steel tube thickness

4.4 轴压比

保持其他参数不变,组合节点轴压比取不同的值,分别为 0.56、0.4 和 0.3,计算结果如图 9 所示.从图中可以看出,虽然轴压比改变,但节点的滞回曲线形状没有受到影响,节点承载力是随着轴压比的增大而减小的,增大轴压比到某值以后,其耗能稍微有所减小,这是由于 $P-\Delta$ 效应引起的竖向压力和附加弯矩增大所导致的.当轴压比值增长到 0.4,节点域下部受压一侧柱壁开始屈服,节点承载力呈下降趋势;当轴压比接近 0.6 时 ($n=0.56$),对整体结构十分不利,因为节点域下部钢管壁已经屈曲.这种情况与“强柱

弱梁”相违背,因此在抗震设计中必须限制轴压比,最好控制其小于0.4,还要进行“强柱弱梁”验算。

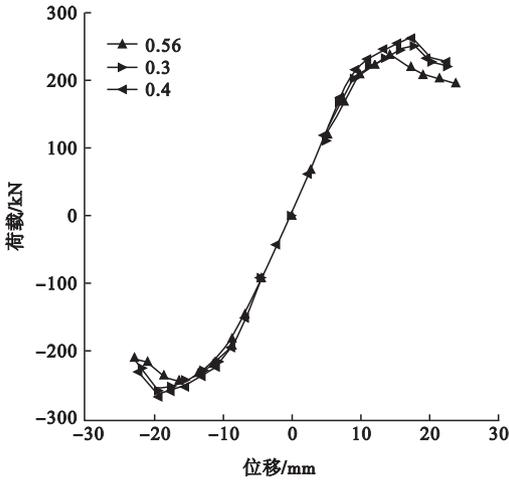


图9 不同轴压比的节点骨架曲线

Fig.9 Joint skeleton curves for different axial load ratio

5 结论

(1)该类型节点表现出良好的耗能能力和延性。当节点破坏时,主要表现出梁端部形成明显塑性铰,随着钢管壁厚度增加,塑性铰位置略向外移,节点刚度增加,节点的耗能能力增强。

(2)轴压比的改变对该节点的抗震性能影响显著,轴压比的增大使节点承载力有所削弱。因此轴压比不宜过大,建议轴压比应小于0.4。

(3)随着增大贯穿隔板厚度及外伸长度,组合节点承载力呈不同程度的增大,而且隔板的外伸长度的作用较为明显;另外,钢管壁厚度对节点承载力也有影响。建议隔板的外伸长度取60~100 mm,隔板厚度取10 mm左右,钢管壁厚度取8~10 mm。

参考文献

[1] LIAO W, LOH C H, WANG S. Earthquake response of RC moment frames subjected to near-fault ground motions [J]. The structural design of tall buildings, 2010, 10: 219 - 229.

[2] NAEIM F, KELLY J M. Design of seismic isolated structures: from theory to practice [M]. New Jersey: John Wiley and Sons Inc, 2009.

[3] SHANMUGAM E, LAKSHMI B. An analytical model for thin-walled steel box columns with concrete-fill [J]. Engineering structures, 2012, 24(6): 825 - 838.

[4] CAMPIONE G, SCIBILIA N. Beam-column behavior of concrete filled steel tubes [J]. Steel and composite structures, 2012, 2(4): 259 - 276.

[5] VRCELJ Z, UY B. Behaviour and design of steel square hollow sections filled with high strength concrete [J]. Australian journal of structural engineering, 2010, 3(3): 153 - 169.

[6] NISHIYAMA I, FUJIMOYO T. Inelastic force-deformation response of joint shear panels in beam-column moment connection-filled tubes [J]. Journal of structural engineering, 2009, 130(2): 130 - 144.

[7] RACKWITZ R, FIESSIER B. Structural reliability under combined random load sequence [J]. Computers and structures, 2009, 9(5): 489 - 494.

[8] 王砾瑶, 张勇, 边永丰. 钢管混凝土柱与钢梁隔板贯通式节点抗震性能研究 [J]. 建筑结构学报, 2010(增刊1): 398 - 403.
(WANG Liyao, ZHANG Yong, BIAN Yong-feng. Seismic performance research for concrete filled steel tubular column and steel beam clap-board-through-type node [J]. Journal of building structures, 2010(S1): 398 - 403.)

[9] 庄茁, 由小川, 廖剑辉. 基于 ABAQUS 的有限元分析与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
(ZHUANG Zhuo, YOU Xiaochuan, LIAO Jianhui. Finite element analysis and application based on ABAQUS [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2009.)

[10] 王先铁, 郝继平, 周观根. 方钢管混凝土穿芯高强螺栓-端板节点滞回性能研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(1): 1 - 2.
(WANG Xiantie, HAO Jiping, ZHOU Guan-gen. Research for hysteretic behavior of high strength bolts with end-plate joints in concrete

- filled square steel tubes [J]. Progress in steel building structures, 2009, 11(1): 1-2.)
- [11] 徐礼华, 凡红, 刘胜兵, 等. 方钢管混凝土柱-钢梁节点抗震性能试验研究与有限元分析[J]. 工程力学, 2008, 25(2): 122-131. (XU Lihua, FAN Hong, LIU Shengbing, et al. Square concrete-filled steel tube column-steel beam node seismic performance experimental research and finite element analysis [J]. Engineering mechanics, 2008, 25(2): 122-131.)
- [12] MATSUI C. Strength and behavior of frames with concrete filled square steel tubular columns under earthquake loading [C]. Harbin: The International Structure, 2004.
- [13] FUJIMOTO T, INAI E, TOKINOYA H, et al. Behavior of beam-to-column connection of CFT column system under seismic force [C]. Proceeding of 6th ASCCS International Conference on Steel-Concrete Composite Structures, Los Angeles: [s. n.], 2000.
- [14] 杜国锋, 江楚雄. 方钢管混凝土柱-钢梁框架节点优化设计[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2006, 28(6): 509-512. (DU Guofeng, JIANG Chuxiong. Optimum design of concrete filled square steel tubular column-steel beam frame joint [J]. Journal of sanxia university (natural science), 2006, 28(6): 509-512.)
- [15] 庄磊, 陈以一, 李刚, 等. H型钢梁与钢管柱隔板贯通式连接节点抗震性能试验[J]. 建筑钢结构进展, 2008, 8(1): 23-29. (ZHUANG Lei, CHEN Yiyi, LI Gang, et al. Experimental study on seismic behavior of H-shaped steel beam and steel tube column through connections [J]. Progress in steel building structures, 2008, 8(1): 23-29.)
- [16] 阎石, 邵鹿峰, 张曰果, 等. 方钢管混凝土柱-H型钢梁组合节点抗震性能试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(2): 197-303. (YAN Shi, SHAO Lufeng, ZHANG Yueguo, et al. Experimental study on seismic behavior of concrete-filled square steel tubular column-H steel beam composite joint [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(2): 197-303.)
- [17] YAN Shi, SHAO Lufeng, ZHANG Yueguo, et al. Nonlinear seismic analysis analysis on joint of concrete-filled square steel tube column and H-shaped steel beam [C]. 15th World Conference of Earthquake Engineering. Lisbon: Portuguese Society for Earthquake Engineering, 2012.
- [18] 中国工程建设标准化协会. 矩形钢管混凝土结构技术规程: CECS159—2004 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2004. (China Engineering Construction Standardization Association. Technical specification for concrete-filled rectangular steel tube structure: CECS159—2004 [S]. Beijing: China Planning Press, 2004.)
- [19] 中华人民共和国国家标准建设部. 建筑结构设计规范: GB50011—2001 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (Ministry of Construction of the People's Republic of China National Standards of The People's Republic of China. Code for seismic design of building structures: GB50011—2001 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2004.)
- [20] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2008. (HAN Linhai. Concrete-filled steel tube structure: theory and practice [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008.)