

采用新型双 T 型钢-穿芯螺栓连接的方钢管 混凝土柱-钢梁节点滞回性能研究

张繁荣, 徐 强, 蒋 攀, 朱 勇, 李晓昇

(中铁广州工程局集团深圳工程有限公司, 广东 深圳 518054)

摘要: 提出了一种新型双 T 型钢-穿芯螺栓连接的方钢管混凝土柱-钢梁节点。该节点具有易于装配, 震后可更换的特点。采用有限元分析软件 ABAQUS 建立足尺有限元分析模型, 进行低周往复荷载作用下的精细化数值模拟, 研究了 T 型钢翼缘、腹板以及抗剪板的厚度对该节点滞回性能的影响。结果表明: 新型双 T 型钢-穿芯螺栓连接的方钢管混凝土柱-钢梁节点具有良好的强度、刚度和耗能能力。T 型钢翼缘厚度对节点承载力影响较大, 对节点初始刚度和耗能能力的影响较小。T 型钢腹板厚度对节点承载力、节点刚度及耗能能力均有较大影响, 增大腹板厚度可提高节点的承载力和初始刚度, 梁端转角达到 0.035 后, 增加腹板厚度可提高节点的耗能能力。抗剪板厚度在该节点的设计中不起控制作用。

关键词: 方钢管混凝土柱; 组合结构; 装配式梁柱节点; 滞回性能; 数值模拟

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)01-0054-09

Study on hysteretic behavior of new steel beam to concrete-filled square steel tubular column joint with double T-stub-bidirectional bolts

ZHANG Fanrong, XU Qiang, JIANG Pan, ZHU Yong, LI Xiaosheng

(China Railway Guangzhou Engineering Group Shenzhen Engineering Co. Ltd., Guangdong Shenzhen 518054, China)

Abstract: This paper proposed a new type of steel beam to concrete-filled square steel tubular column joint which is connected with double T-stub-bidirectional bolts. This kind of connection is an easy assembled and replaceable joint. Full-scale finite element analysis model was established by using the nonlinear finite element software ABAQUS, and the numerical simulation analysis under low cycle loading was carried out, so as study the influence of the different thickness of T-stub steel flange, web and shear plate on the hysteretic behavior of this joint. Results show that the steel beam to concrete-filled square steel tubular column joint with double T-stub-bidirectional bolts has good strength, stiffness and energy dissipation behavior. The thickness of T-stub steel flange has great influence on the bearing capacity of the joint but limited influence on stiffness and energy dissipation. The thickness of the T-stub steel web has a great influence on the strength, stiffness and energy dissipation of joint. The thickness of the shear plate has little effect on hysteretic behavior of joint.

Key words: concrete-filled square steel tubular column; composite structure; assembled beam-column joint; hysteretic behavior; numerical simulation

在钢结构设计中, 梁柱节点连接一直是重点, 节点的性能将直接影响整体结构的强度、刚度以及稳定性。半刚性连接是指将梁柱通过摩擦性高强螺栓和连接件进行连接, 节点既能承受一定的弯矩, 又能允许梁柱间产生一定的转动, 使结构受力更加合理^[1]。梁柱 T 型钢连接节点是一种典型半刚性连接, 也是被视为最刚劲的半刚性连接方式, 该节点构造简单、承载力高, 刚度大, 施工简便, 在工程施工中已得到了广泛的应用^[2]。李幅昌等^[3]对 T 型钢连接的方钢管柱-H 型钢梁节点

进行 ABAQUS 有限元分析研究, 段祺成^[4-5]对 T 型件连接进行试验研究和理论分析, 研究均表明, T 型连接件连接属于半刚性节点。舒兴平等^[6]进行数值模拟, 分析了 T 型钢不同参数对节点性能的影响, 研究表明, 节点的半刚性对钢框架的力学性能影响较大。郑小伟^[7]通过试验研究和有限元分析, 研究了 T 型钢连接梁

柱节点在循环荷载作用下的受力性能, 研究表明, T 型钢连接节点具有较好的延性。Hantouche^[8]等对双 T 型钢连接中, H 型钢柱翼缘大变形

对连接螺栓产生的二阶撬力进行研究,研究表明,二阶撬力对螺栓受力影响较大,设计中应增强螺栓连接的承载力。Herrera^[9-10]等通过试验研究和有限元分析对双T型钢连接节点的性能进行探讨,研究表明,腹板与翼缘连接处的焊缝在循环荷载作用下未发生重大破坏。Wei Bao^[11]等对高强螺栓在T型钢连接中基于弯矩分布的力学性能进行研究,结果表明,节点设计中应考虑螺栓弯曲的影响。

近年来,高层、超高层结构中多采用钢管混凝土柱作为结构体系中主要的竖向承重构件。钢管混凝土柱与钢梁的连接节点常采用内隔板式、外环式和贯通隔板式节点,此类连接虽具有较好的受力性能,但在加工和安装过程中存在较多焊接工作,节点性能易受施工质量的影响。为提高节点的连接质量,进一步简化安装过程,本文提出了一种新型双T型钢-穿芯螺栓连接的梁柱节点。该节点在传统T型钢连接的梁柱节点基础上,加入抗剪板与穿芯螺栓,使其可用于方钢管混凝土柱与钢梁的连接。节点组成如图1所示。该节点采用全螺栓连接,现场无需焊接操作,可较好的保证施工质量。由于钢管内填入了混凝土,使得节点本身具有较好的抗压性能,梁端弯矩产生的梁翼缘拉应力,可通过穿芯螺栓传递到柱的另一侧,转换为穿芯螺栓对柱壁的压力,避免柱壁发生受拉鼓曲。

本文利用有限元分析软件ABAQUS建立了足尺有限元模型,进行了低周往复荷载作用下的精细化数值模拟分析,研究T型钢的翼缘、腹板及抗剪板的厚度对该节点滞回性能的影响。

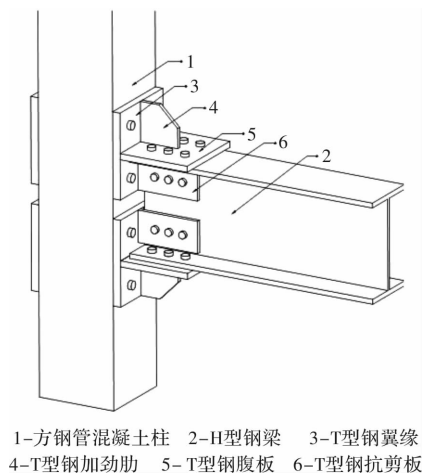


图1 节点组成

Fig. 1 Joint composition

1 模型设计

本文有限元模型,柱子截面为 $\square 400 \times 12$ 的方钢管,内填C40细石混凝土。钢梁采用 $H500 \times 300 \times 16 \times 24$ 焊接组合H形截面。T型钢截面为 $T400 \times 400 \times 20 \times 25$,T型钢加劲肋尺寸为 $-200 \times 200 \times 20$,T型钢抗剪板尺寸为 $-320 \times 160 \times 20$ 。T型钢翼缘、腹板、抗剪板的厚度为变化参数,具体取值见后文。T型钢翼缘与方钢管混凝土柱连接的穿芯螺栓采用10.9级M30高强螺栓,T型钢腹板与H型钢梁翼缘连接螺栓采用10.9级M27高强螺栓,T型钢抗剪板与H型钢梁腹板连接螺栓采用10.9级M24高强螺栓。除高强螺栓外,其他钢材均采用Q355B级钢。

2 有限元模型建立

采用有限元软件ABAQUS/Explicit模块进行数值模拟,在分析中定义整体质量缩放为10,计算结果通过动能占内能比例5%以内,判断符合准静态分析。模型中考虑几何非线性与材料非线性。

2.1 材料本构关系

模型中各构件均采用实体单元,所用钢材均采用Q355B级钢,钢材弹性模量 $E=2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比0.3,材料塑性模型采用弹性-线性强化模型和随动强化法则^[12],强化模量 $E_t=0.02E$ 。为考虑循环荷载对钢材性能的影响,定义了钢材的柔性损伤,具体参数详见文献^[13-14]。方钢管内填C40混凝土,混凝土弹性模量 $E_c=27\,000 \text{ N/mm}^2$,塑性模型采用ABAQUS中的混凝土塑性损伤模型,本构关系采用韩林海^[15]提出的考虑方钢管对混凝土约束的修正本构模型。

2.2 相互作用及网格划分

方钢管内壁与混凝土之间的接触,沿法线方向采用“硬”接触,切线方向采用库伦摩擦模型,摩擦系数取0.6^[15]。T形连接件腹板、抗剪板与钢梁以及T形连接件翼缘与方钢管柱壁以及螺栓各接触面之间的接触,沿法线方向采用“硬”接触,切线方向采用库伦摩擦模型,摩擦系数取0.3。各构件网格均选用8节点线性减缩积分六面体单元(C3D8R)。网格划分中为减小沙漏效应的影响,沿厚度方向分布4个单元,在节点处采用小尺寸控制的网格加密,其他部位采用大尺寸网格。

2.3 边界条件及加载制度

将方钢管柱顶、底两端截面分别耦合于相应截面顶端的参考点,约束参考点各方向的平动自

由度和沿柱轴向的转动自由度, 释放除柱轴向外的其他转动自由度. 在梁端部设置梁端截面耦合点, 作为位移加载点. 加载时, 先施加螺栓预紧力, 依据《钢结构设计标准》(GB 50017-2017)^[16]要求, M30、M27 和 M24 高强螺栓分别施加 355 kN、290 kN 和 225 kN 的预拉力. 由于显式算法无法直接施加螺栓预拉力, 故将螺栓预拉力转换为压强荷载施加于螺帽两侧. 之后再以单倍屈服位移为级差, 在梁端施加位移控制的循环往复荷载, 屈服位移由单向位移加载结果确定, 所有模型屈服位移统一采用 28 mm, 位移向上为正向加载, 向下为负向加载. 模型边界条件及加载方式如图 2 所示.

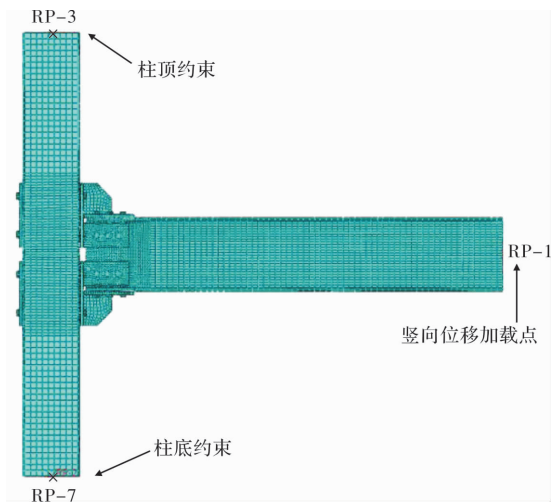


图 2 模型边界条件及加载方式

Fig. 2 Model boundary conditions and loading method

3 有限元建模方法验证

对文献[7]中的试件 BASE 采用本文方法建立有限元模型, 进行数值分析, 验证本文建模方法的正确性. 试件 BASE 所用钢材除高强度螺栓外, 均选用 Q235B 级钢, 钢梁截面为 $\text{HM}294 \times 200 \times 8 \times 12$, 钢柱截面为 $\text{HW}300 \times 300 \times 10 \times 15$, T 型钢截面为 $\text{TN}250 \times 200 \times 10 \times 15$, 螺栓采用 10.9 级 M20 高强度螺栓. 钢材性能与文献[7]中材性试验数据保持一致, 详见表 1.

表 1 材料力学参数

Tab. 1 Mechanical properties of materials

材料	E/MPa	f_y/MPa	ϵ_y	f_u/MPa
高强螺栓	187 500	1 063.9	0.005 6	1 107.9
Q235	206 000	263.2	0.001 3	440.7

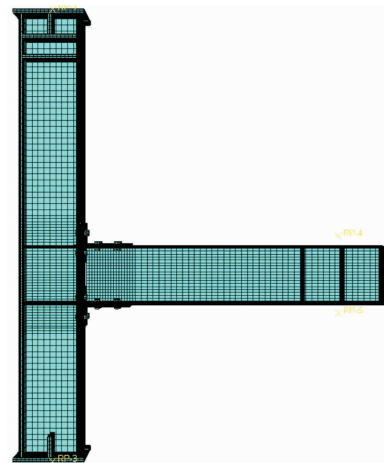
表 2 有限元分析与试验结果对比

Tab. 2 comparison of finite element analysis and test results

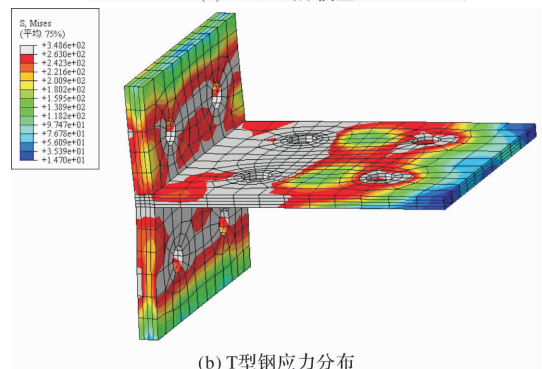
BASE	峰值位移 /mm	峰值荷载 /kN	峰值荷载 误差/%
试验值	60.5	133.3	1.7
有限元分析	59.2	131.0	

图 3 为节点应力分布, 将图 3 的有限元分析应力分布与文献[7]的试验现象进行对比可以知, 有限元分析较好地模拟了试验中的 T 型钢翼缘与柱翼缘分离的试验现象, 也较好地模拟了试验中节点各部位的应力分布.

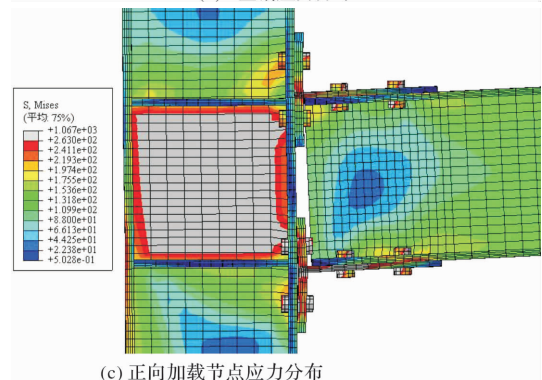
图 4 为有限元分析结果和试验结果对比. 负方向加载时, 有限元与试验的承载力发展趋势较为一致, 正向加载峰值荷载之前, 承载力发展趋势较为一致, 加载后期试验中由于 T 型钢翼缘的断



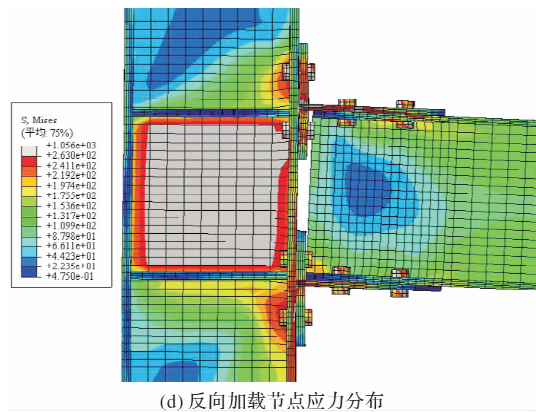
(a) BASE试件模型



(b) T型钢应力分布



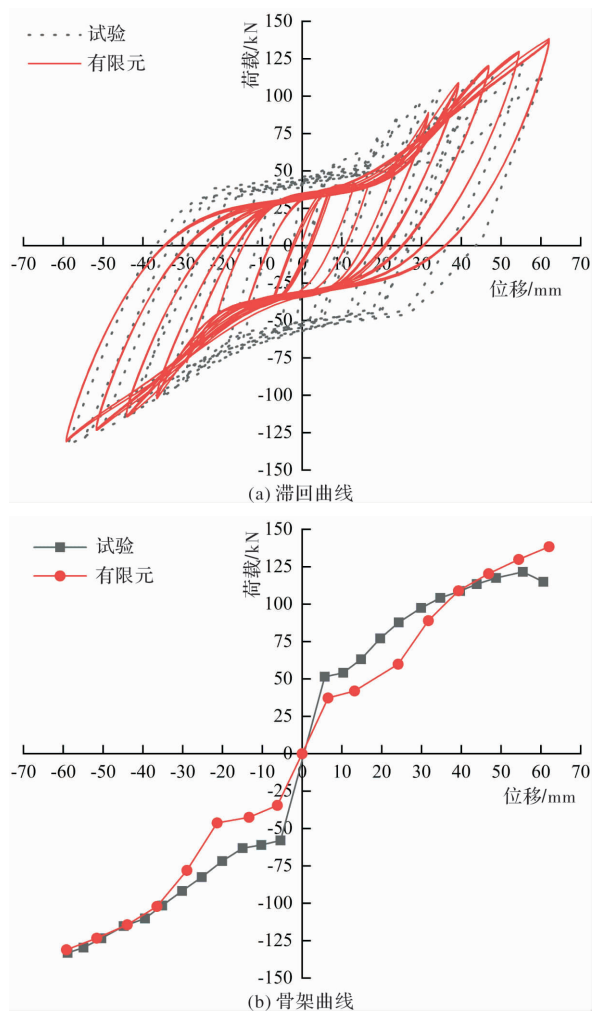
(c) 正向加载节点应力分布



(d) 反向加载节点应力分布

图 3 有限元应力分析

Fig. 3 Finite element stress analysis



(a) 滞回曲线

(b) 骨架曲线

图 4 结果对比

Fig4 Comparison of Results

裂屈服破坏,造成承载力下降。由于缺少较为全面的试验钢材的材性数据,有限元模型中各构件均采用同一种材料,造成有限元模型的滞回曲线捏缩现象较试验更为严重。同时由于本文分析模型中仅考虑钢材的损伤退化,未考虑钢材断裂,所以在加载后期节点未发生明显承载力下降。由表 2 的有限元分析与试验结果对比可知,有限元分

析与试验相比峰值荷载误差为 1.7%,峰值位移误差为 2.1%。根据以上对验证模型的分析可知,本文提出的数值分析方法能较为准确地反映试件在循环荷载作用下的受力性能。

4 有限元分析结果

本文以 T 型钢翼缘、腹板以及抗剪板的厚度为变化参数,建立 3 组 10 个足尺有限元模型,通过在梁端施加循环往复荷载,研究 T 型钢翼缘、腹板以及抗剪板的厚度对该节点滞回性能的影响。各分析参数取值见表 3。

表 3 参数取值

Tab. 3 Value of parameters

参数	厚度/mm			
T 型钢翼缘厚度 t_f	25	30	36	40
T 型钢腹板厚度 t_b	16	20	25	30
T 型钢抗剪板厚度 t_s	16	20	25	30

4.1 传统焊接节点与新型节点对比分析

图 5 为传统焊接节点与新型双 T 型钢-穿芯螺栓节点 BASE 模型的滞回曲线对比,图 6 为传统焊接节点与新型双 T 型钢-穿芯螺栓节点 BASE 模型的节点应力对比。从图 5 滞回曲线对比可以看出,与传统焊接节点相比,新型双 T 型钢-穿芯螺栓连接可以明显提高节点承载力,增大节点刚度,增加节点耗能,节点滞回曲线更加饱满,延性更好,抗震性能更加优越。从图 6 节点应力对比分析可以看出,传统焊接节点在加载后期,梁翼缘与柱连接处,由于循环往复荷载的作用,梁翼缘发生破坏,网格应力降为零从而删除。焊接节点柱子与钢梁相连一侧柱壁局部受力较为明显,而新型双 T 型钢-穿芯螺栓节点柱子两侧应力分布均匀,传力机制更加合理。

新型双 T 型钢-穿芯螺栓节点中钢梁的内力通过 T 型钢翼缘、腹板、抗剪板及穿芯螺栓传递给柱子, T 型钢腹板与梁翼缘连接将梁端弯矩在梁翼缘产生的拉、压力传递至 T 型钢翼缘, T 型钢翼缘通过穿芯螺栓与柱壁相连接,穿芯螺栓将梁端弯矩产生的梁翼缘拉应力,传递至柱壁另一侧转换为对柱壁的压力,可防止柱壁受拉发生鼓曲。T 型钢翼缘可增大柱子受压面积,降低柱子局部压应力。梁端剪力通过钢梁腹板传递至 T 型钢抗剪板,再通过穿芯螺栓传递至方钢管混凝土柱。T 型钢加劲肋可以提高节点的刚度和承载力,同时钢梁在震损后可拆卸进行更换。

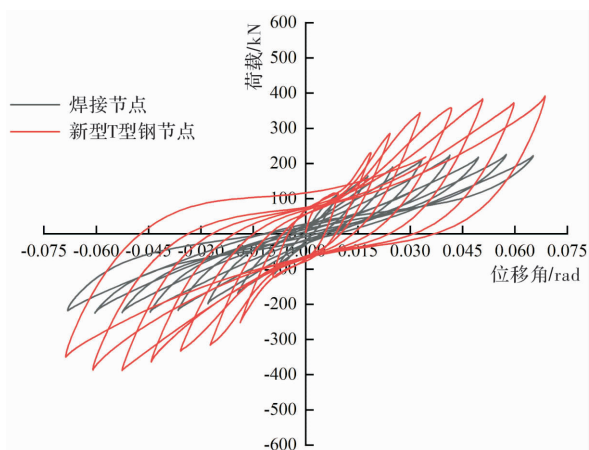
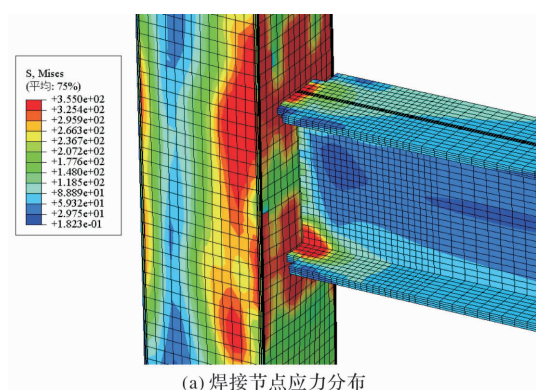
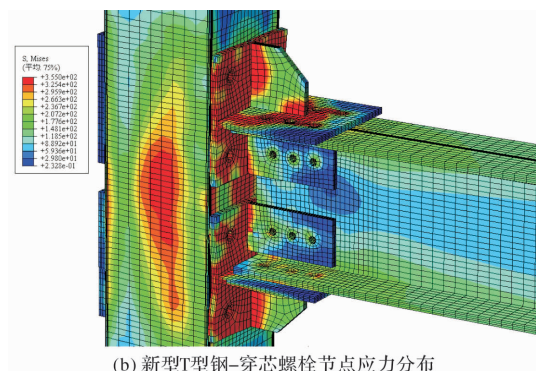


图5 滞回曲线对比分析

Fig. 5 Comparative analysis of hysteresis curves



(a) 焊接节点应力分布



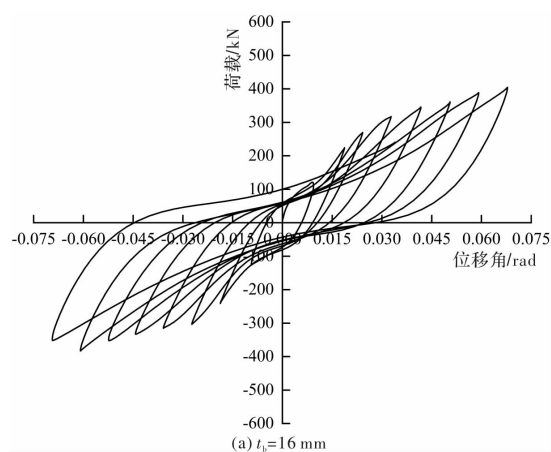
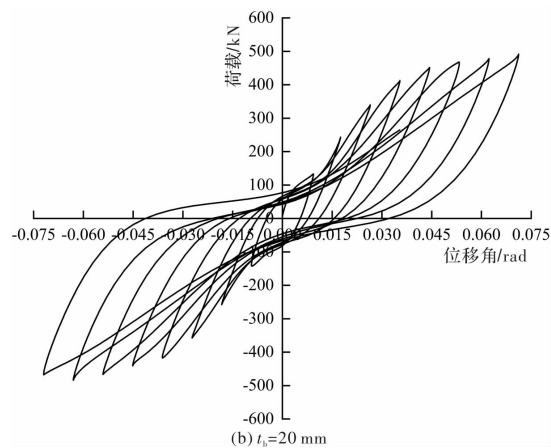
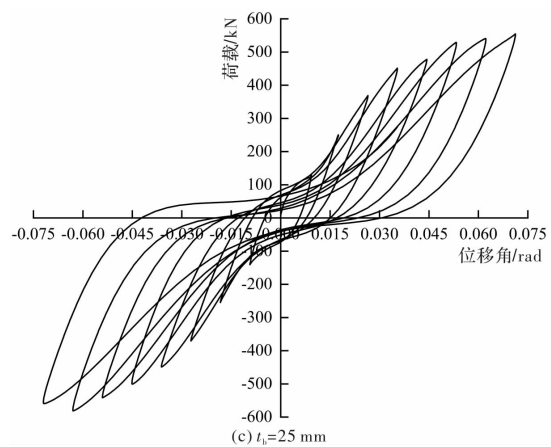
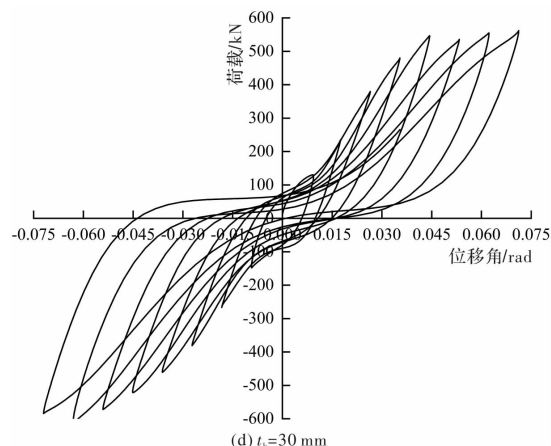
(b) 新型T型钢-穿芯螺栓节点应力分布

图6 节点应力对比

Fig. 6 Comparison of joints stress

4.2 T型钢翼缘厚度对节点滞回性能的影响

图7分别为不同T型钢翼缘厚度模型的滞回曲线、骨架曲线、能量耗散曲线及刚度退化曲线。由图7(e)的骨架曲线可知,随着T型钢翼缘厚度的增加,节点承载力明显增大,但当T型钢厚度增加到满足节点承载力要求之后,T型钢厚度不再是节点承载力的主要影响因素,继续增加T型钢翼缘厚度对节点承载力的影响不再明显,因此T型钢翼缘厚度为36 mm的模型与40 mm的模型的承载力差别较小。由图7(f)的能量耗散曲线可知,T型钢翼缘厚度对节点的滞回耗能影响较小。由图

(a) $t_f=16\text{ mm}$ (b) $t_f=20\text{ mm}$ (c) $t_f=25\text{ mm}$ (d) $t_f=30\text{ mm}$

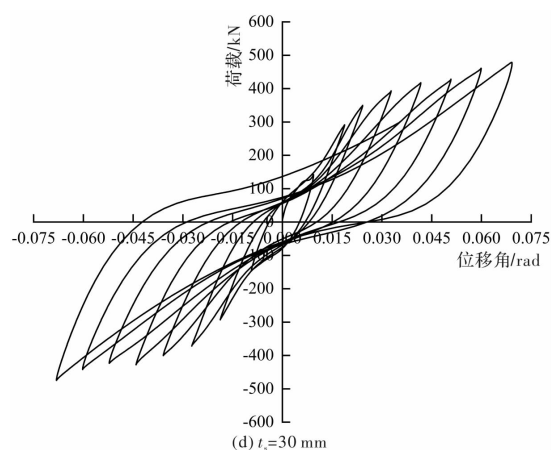
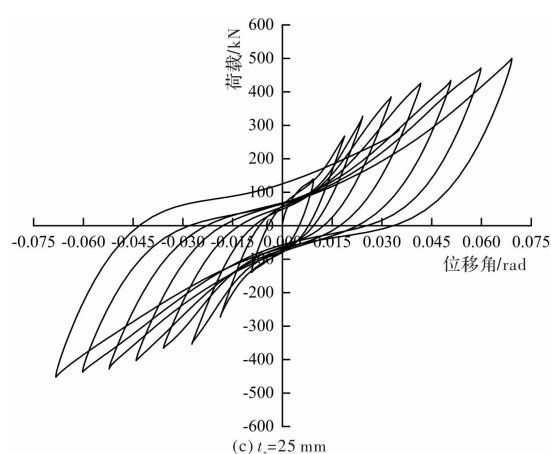
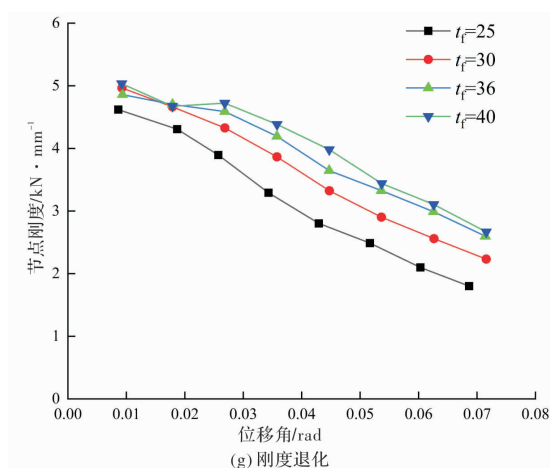
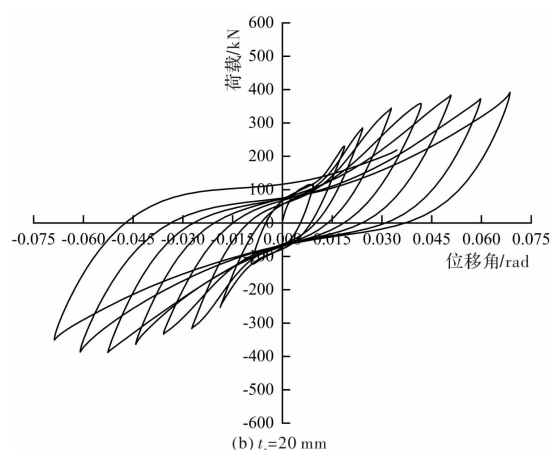
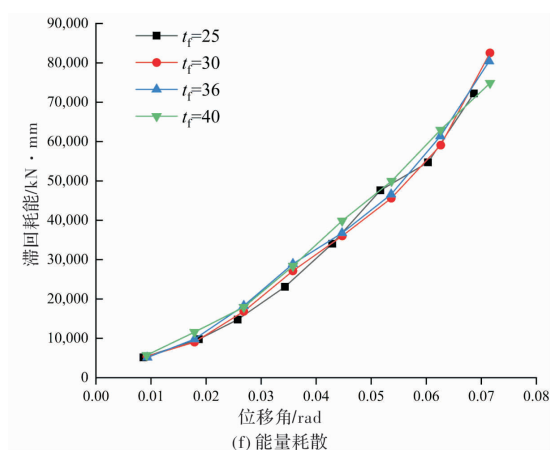
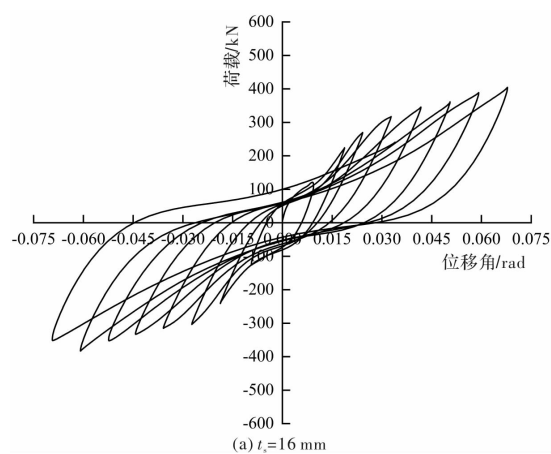
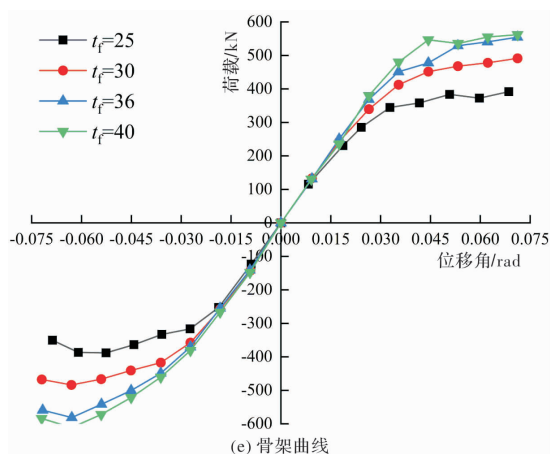


图7 T型钢翼缘厚度对滞回性能的影响

Fig. 7 Influence of flange thickness of T-stub steel on hysteretic behavior

7(g)的刚度退化曲线可知,增加T型钢翼缘厚度对节点的初始刚度影响较小,但会影响进入弹塑性阶段后的节点刚度。梁端转角超过0.025后,不同T型钢翼缘厚度的模型刚度退化趋势一致,T型钢翼缘厚度大的模型,节点刚度也较大。

4.3 T型钢腹板厚度对滞回性能的影响

图8分别为不同T型钢腹板厚度模型的滞回曲线、骨架曲线、能量耗散曲线及刚度退化曲线。

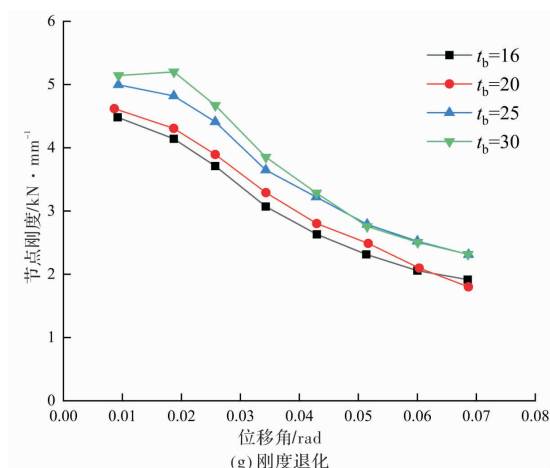
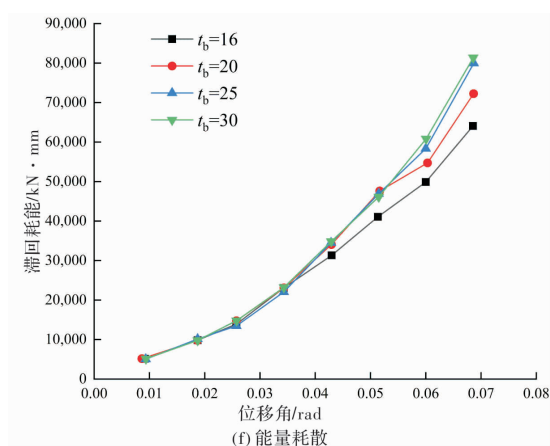
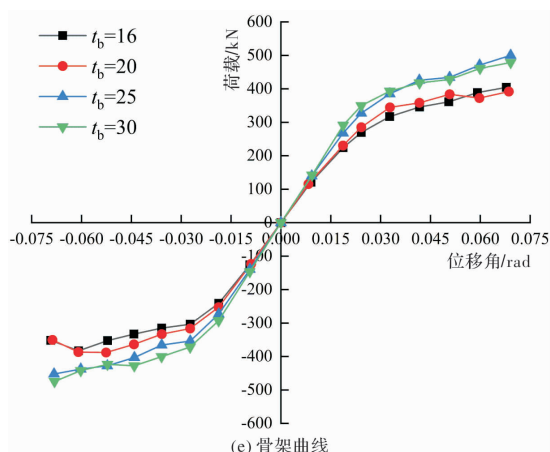


图8 T型钢腹板厚度对滞回性能的影响

Fig. 8 Influence of web thickness of T-stub steel on hysteretic behavior

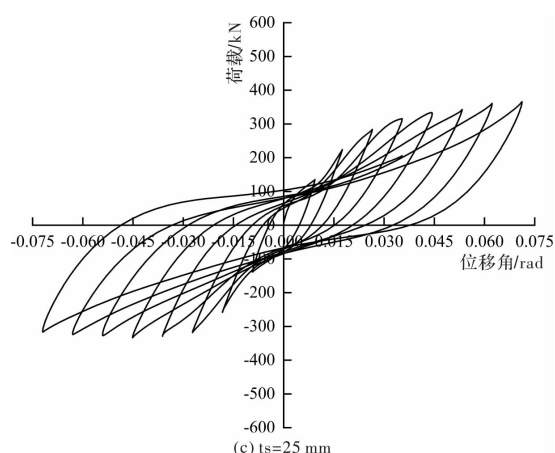
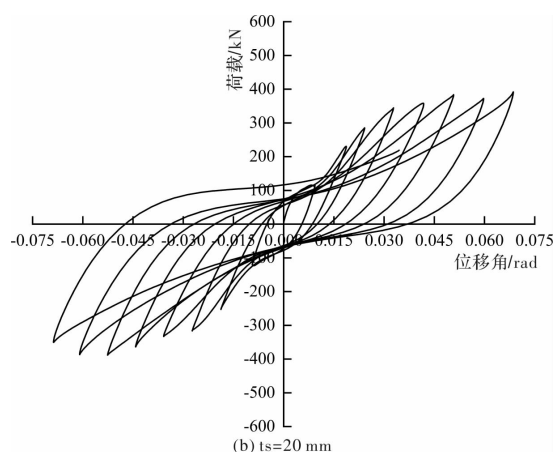
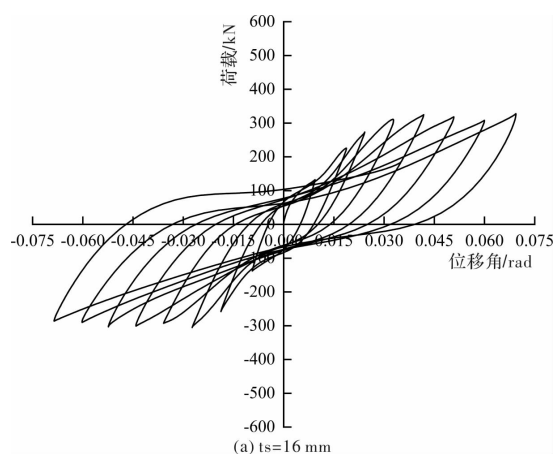
由图8(e)的骨架曲线可知,当T型钢腹板厚度较小时,节点破坏发生在T型钢腹板处,增大T型钢腹板厚度可以提高节点的承载力。当T型钢腹板厚度达到一定程度后,连接的承载力高于钢梁的承载力,节点的破坏发生在梁端,此时继续增大T型钢腹板厚度对节点的性能不再产生显著影响。由图8(f)的能量耗散曲线可知,梁端转角达到0.035前,T型钢腹板厚度对节点的耗能能力影

响较小,不同腹板厚度的能量耗散曲线基本重合,但当梁端转角达到0.035之后,增加腹板厚度可提高节点的耗能能力。

由图8(g)的刚度退化曲线可知,T型钢腹板厚度对节点的初始刚度影响较大,初始刚度随腹板厚度的增加而增大,不同腹板厚度的节点刚度退化的幅度较为一致。

4.4 T型钢抗剪板厚度对滞回性能的影响

图9分别为不同T型钢抗剪板厚度模型的滞回曲线、骨架曲线、能量耗散曲线及刚度退化曲线。由骨架曲线、能量耗散曲线与刚度退化曲线可知,T型钢抗剪板厚度对节点的初始刚度、承载



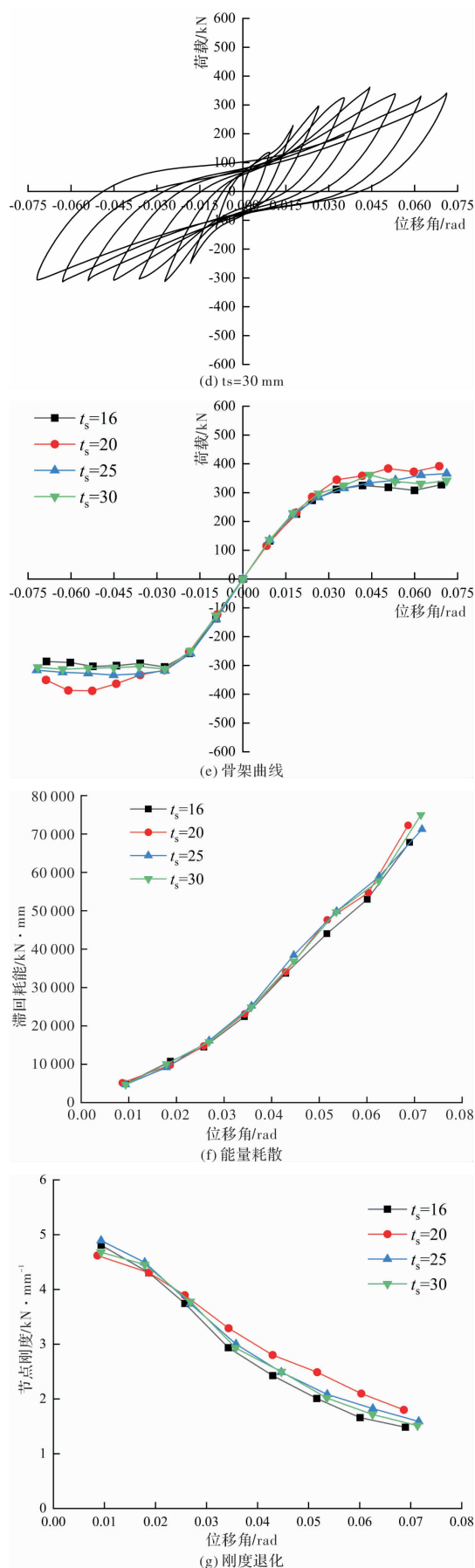


图9 T型钢抗剪连接板厚度对滞回性能的影响

Fig. 9 Influence of shear plate thickness of T-stub steel on hysteretic behavior

力、耗能能力和刚度退化影响均较小,说明节点的抗剪板厚度对节点的性能不起控制作用。

5 结论

(1) 采用新型双T型钢-穿芯螺栓连接的方钢管混凝土柱-钢梁节点传力机制明确合理,现场无焊接操作,可确保施工质量,简化安装过程。该节点具有足够的强度和刚度,和较好的延性,可以满足“强节点,弱构件”的抗震设防目标。

(2) T型钢翼缘厚度对节点承载力影响较大,对节点初始刚度影响较小。增加翼缘厚度可在一定范围内提高节点承载力。T型钢翼缘厚度对节点的耗能能力的影响较小。

(3) T型钢腹板厚度对节点承载力、节点刚度及耗能能力均有较大影响,增大腹板厚度可提高节点的承载力和初始刚度,梁端转角达到0.035后,增加腹板厚度可提高节点的耗能能力。

(4) T型钢抗剪板厚度对节点的滞回性能影响较小,表明抗剪板厚度在该节点的设计中不起控制作用。

参考文献 References

- [1] 彭海燕,付涛,吴迪. 半刚性梁柱连接的滞回性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 2013, 39(3): 32-35.
PENG Haiyan, FU Tao, WU Di. Hysteretic behavior of the T-stub semi rigid beam-to-column connections [J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(3): 32-35.
- [2] 黄海棠. T型钢梁柱半刚性连接节点在静载作用下的极限承载性能研究[D]. 广西: 广西大学, 2012.
HUANG Haitang. Research on the ultimate strength of steel beam-to-column T-stub semi rigid connections under static load[D]. Guangxi: Guangxi University, 2013.
- [3] 李幅昌,孙卿,郭晓龙,等. T型钢连接的方钢管柱-H型钢梁半刚性节点滞回性能的有限元分析[J]. 工程力学, 2014, 31(增刊): 32-35.
LI Duochoang, SUN Qing, GUO Xiaolong, et al. Finite element analysis on hysteretic performance of a T-stub connected semi-rigid joint between rectangular steel tube column and H-shaped steel beam[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(s): 32-35.
- [4] 段祺成. 梁柱外伸端板、T型连接节点的试验研究[D]. 湖北: 武汉理工大学, 2003.
DUAN Qicheng. Experimental research on the extended-end-plate connections and T-connections of beam-to-column[D]. Hubei: Wuhan University of Technology, 2003.
- [5] 段祺成,蒋沧如. 钢框架梁柱T型钢连接节点的性能研究[J]. 建筑结构, 2005, 35(6): 39-40.

- DUAN Qicheng, CANG Hairu. Research on the behavior of beam-to-column T-connections of steel frame [J]. Building Structures, 2005, 35(6): 39-40.
- [6] 舒兴平, 胡习兵, 熊曜. 钢框架梁柱 T 型钢半刚性连接节点的性能研究[J]. 建筑结构, 2006, 36(8): 6-9.
- SHU Xingping, HU Xibing, XIONG Yao. Research on the behavior of T-stub semi-rigid connections of steel frames [J]. Building Structures, 2006, 36(8): 6-9.
- [7] 郑小伟. 钢框架梁柱 T 型钢连接节点在循环荷载作用下的受力性能研究[D]. 广西: 广西大学, 2013.
- ZHENG Xiaowei. Study of the mechanical behaviors of steel frames beam-to-column T-stub connection joint under cyclic load [D]. Guangxi: Guangxi University, 2013.
- [8] ELIE G Hantouche, ANANT R Kukreti, GIAN A Rassati. Investigation of secondary prying in thick built-up T-stub connections using nonlinear finite element modeling [J]. Engineering Structures, 2012, 36(3): 113-122.
- [9] HERRERA Ricardo A, BRAVO Miguel, et al. Performance of built-up T-stubs for Double T moment connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 88(9): 289-295.
- [10] BRAVO Miguel, HERRERA Ricardo A. Performance under cyclic load of built-up T-stubs for double T moment connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 103(12): 117-130.
- [11] BAO Wei, JIANG Jin, YU Zhiwei, et al. Mechanical behavior of high-strength bolts in T-stubs based on moment distribution [J]. Engineering Structures, 2019 196(10): 1-11.
- [12] CHABOCHE J L. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity [J]. International Journal of Plasticity, 1986, 2(2): 149-188.
- [13] 周天华, 李文超, 管宇, 等. 基于应力三轴度的钢框架循环加载损伤分析 [J]. 工程力学, 2014, 31(7): 146-155.
- ZHOU Tianhua, LI Wenchao, GUAN Yu, et al. Damage analysis of steel frames under cyclic load based on stress triaxiality [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(7): 146-155.
- [14] 李文超. 微观机制断裂理论在高强钢材料及钢结构断裂预测分析中的应用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.
- LI Wenchao. Research on application of micro-mechanism based fracture theory in fracture prediction analysis of high-strength steel and structures [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [15] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践 [M]. (第三版) 北京: 科学出版社, 2007.
- HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017-2017 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017-2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building press, 2018.

(编辑 沈 波)