

T形件连接方钢管混凝土柱与钢梁的节点有限元分析

方亮^{1,4}, 袁峥嵘², 余崇³

(1.湖南农业大学工学院, 湖南长沙 410128; 2.湖南远大工程设计有限公司, 湖南长沙 410013; 3.长沙房(产集团)有限公司, 湖南长沙 410015; 4.湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要:为考察T形件连接的方钢管混凝土柱与钢梁的组合节点在低周往复荷载作用下的受力特点,在试验研究的基础上,采用有限元分析软件ABAQUS,对6个采用T形件连接的方钢管混凝土柱与钢梁试件的节点进行梁端单调加载的三维非线性有限元分析。选用4节点和8节点实体单元模拟节点域方钢管、H型钢梁、混凝土、T形件以及高强螺栓,针对节点域接触部位设置了96个普通接触对和32个粘接接触对,并均匀划分网格;采用设置2个分析步的方法对高强螺栓的预拉力影响加以考虑。有限元计算分析得到的节点域破坏形态、峰值抗弯承载力以及 $P-\Delta$ 曲线等结果与试验结果吻合程度较好。节点域应力分布规律分析表明,增大钢管壁厚或T形件翼缘厚度均能提高节点的承载力。

关键词:方钢管混凝土柱; 钢梁; T形连接; 组合节点; 有限元

中图分类号: TU398 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2015)02-0223-06

Finite element analysis for composite joints between the concrete-filled steel square tubular column and steel beam with T-stub

Fang Liang^{1,4}, Yuan Zhengrong², Yu Chong³

(1.College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.Hunan Yuanda Engineering Design Co., Ltd., Changsha 410013, China; 3.Chanfina Group, Changsha 410015, China; 4.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to investigate the behavior of the composite joints which used the T-stub connector under low frequency cyclic loading, the finite element software ABAQUS was used to analyze six specimens: concrete-filled steel square tubular column and steel beam composite joint with T-stub based on the experiment. The 3D nonlinear finite element analysis was about the beam-end under monotonic loading. By simulating square steel tubular, H-shaped steel beam, concrete, T-stub and high-strength bolt with four-node and eight-node solid elements; dividing mesh regularly and setting 96 normal contacts and 32 bonding contacts for contact part of joint region; carrying out the pretension force of high-strength bolt with the step loading method; the simulative results such as failure mode of joint region, flexural capacity and $P-\Delta$ curve agreed well with the experimental data. The stress distribution law of joint region analysis showed that increased thickness of steel tube or flange of T-stub would improve the capacity of the joints.

Keywords: concrete-filled steel square tubular column; steel beam; T-stub connector; composite joints; finite element

钢管混凝土柱与钢梁构件的连接形式多样,采用T形件连接有良好的耗能性和转动延性^[1],被认为是一种刚性较大的半刚性连接形式。Popov等^[2-3]对T形件、焊缝和高强螺栓连接的纯钢梁、柱的边节

点进行了有限元分析。舒兴平等^[4]对H型钢柱与钢梁采用T形件连接的构件边节点进行了理论计算,并与有限元结果对比。宋晓光等^[5]和曹现雷等^[6]分别对H型钢梁、柱T形件节点在低周往复荷载作用下

的滞回性能进行了分析。韩敏等^[7]对H型钢梁柱T形件连接节点在梁端荷载作用下的静力性能进行了分析。Hu等^[8-9]对采用T形件和高强螺栓连接的纯钢管梁柱边节点进行了有限元分析。何益斌等^[10-11]对方钢管混凝土柱-钢梁组合节点进行了抗震性能试验研究及理论分析。袁峥嵘^[12]将钢管混凝土柱与工字形钢梁利用T形件连接成十字形结构,并对这种新型结构进行了试验研究。

笔者运用文献[11]中T形件连接的方钢管混凝土柱与钢梁构件的试验结果,采用有限元分析软件ABAQUS进行梁端单调加载作用下的三维非线性有限元分析。通过合理选取节点单元、材料本构模型和划分节点单元网格,按照试验中试件的基本几何参数和物理参数进行有限元分析建模,并将有限元分析结果与试验结果相比较,验证有限元分析结果的正确性,为更全面而准确地认识该类型连接节点提供依据。

1 有限元分析

1.1 有限元模型建立

为了研究采用T形件连接的方钢管混凝土柱与钢梁构件的受力特点,文献[11]对6个轴压比、T形件翼缘厚度、螺栓直径和方钢管宽厚比不同的试件进行了低周反复加载试验。试件的主要参数见表1。

对于采用T形件连接的方钢管混凝土柱与钢梁的节点,若进行低周反复加载的有限元模拟,不但对计算机配置要求高,而且计算结果不易收敛,难以得到节点的受力规律,同时已有大量研究表明,节点在低周反复荷载作用下的受力性能,很大程度上可由节点在单调荷载作用下的力学性能反映^[13];因此,采用有限元分析软件ABAQUS对6个试件进行梁端单调加载作用下的三维非线性有限元分析。

表1 试件主要参数

Table 1 Main parameters of specimens

试件编号	钢柱截面 尺寸/mm	工字形钢梁 截面尺寸/mm	轴压比	T形件 尺寸/mm	螺栓 规格	螺栓屈服 强度/MPa	螺栓极限 强度/MPa
CFST-1	200×200×5	250×125×5×8	0.3	T260×230×10×18	M16	894.0	1 120.0
CFST-2			0.6	T260×230×10×18	M16	894.0	1 120.0
CFST-3			0.6	T260×230×12×24	M22	896.0	1 125.0
CFST-4	200×200×10		0.3	T260×230×10×18	M16	894.0	1 120.0
CFST-5			0.6	T260×230×10×18	M16	894.0	1 120.0
CFST-6			0.6	T260×230×12×24	M22	896.0	1 125.0

1.2 材料模型

为了更好地模拟试验的实际情况,在有限元分析过程中,将方钢管、H型钢梁和T形件等板材的应力-应变关系曲线简化为理想弹塑性模型,将高强螺栓的应力-应变关系曲线简化为弹性-强化双折线模型。核心混凝土应力应变关系模型采用韩林海等^[14]提出的考虑钢管约束效应的方钢管混凝土的本构关系模型。

1.3 高强螺栓预拉力的施加

有限元分析采用文献[15]中施加螺栓荷载的方法来施加预拉力。螺栓接触分析时设2个步骤:1)施加较小荷载使螺栓与构件接触;2)将螺栓上的荷载施加至预定值,M16和M22高强螺栓分别施加100 kN和190 kN预拉力,并固定其长度,这样可使节点

相关组件在高强螺栓预拉力作用下完成内力重分配后再开始施加其他的荷载。

1.4 接触方式的模拟

组合节点的有限元模型根据不同的接触方式设置不同的接触对,包括柱钢管壁与T形件翼缘的接触对(4个);梁翼缘外侧与T形件腹板的接触对(4个);钢梁翼缘与高强螺栓螺帽的接触对(16个);高强螺栓螺帽与T形件的接触对(16个);高强螺栓螺帽与钢梁螺栓孔壁的接触对(16个);高强螺栓螺帽与T形件螺栓孔壁的接触对(16个);T形件翼缘与穿心螺帽螺帽之间的接触对(8个);穿心螺帽螺帽与T形件翼缘之间的接触对(16个)。高强螺栓螺帽与螺帽之间采用简化的方式,定义为粘接接触(Tie),高强螺栓螺帽与螺帽之间的粘接接触对(16个),穿心

螺杆与螺帽的粘接接触对(16个)。

1.5 边界条件及加载方式

在进行有限元分析时,模拟试验中十字形试件的边界条件,建立4个参考点,分别耦合柱的顶和底面及梁的左右端的加载作用面。边界条件和荷载施加均在参考点上。试验中柱顶和柱底均能绕X轴转动,并且在Z轴方向柱顶施加轴力,因此柱底的参考点放开沿X轴的转动自由度UR1,柱顶放开UR1和沿Z轴方向的自由度U3。节点的边界条件和加载情况如图1。

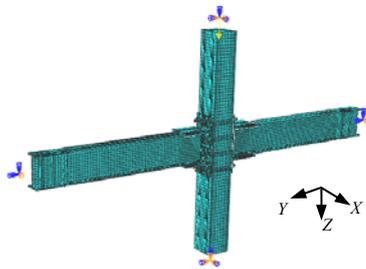


图 1 节点的边界条件和加载方式

Fig.1 The boundary conditions and loading mode of joints

为与试验一致,在有限元分析中的加载过程分为3个加载步:1) 高强螺栓施加预拉力;2) 柱顶施加均布面荷载;3) 梁左、右端参考点上施加单调位移荷载。第1步采用小变形静力分析,后2步采用大变形静力分析,即考虑二阶效应。

1.6 单元选取和网格划分

方钢管柱采用4节点一般壳单元(S4)模拟。H型钢梁采用8节点非协调一次实体单元(C3D8I)模拟。混凝土、T形件连接件、高强螺栓均采用8节点线性减缩积分实体单元(C3D8R)模拟。节点的网格划分尽量规整,选择合适的精度,避免出现不收敛的情况。

2 有限元分析结果

2.1 试件破坏形态

图2-a显示T形件腹板较薄的试件发生破坏时,T形件呈横向Y字形,T形件连接件翼缘出现弯曲变形;图2-b显示CFST-5试件加载后,梁上、下翼缘接近T形件腹板处发生屈曲。图2-c显示CFST-4试件高强螺栓发生剪切破坏,以及有限元模拟时螺栓表现出明显水平向倾斜状。通过对比分析可知,有限元模拟与试验观测结果整体吻合良好。



图 2 破坏形态的试验和有限元对比

Fig.2 The failure mode comparison of tested and theoretical

2.2 抗弯承载力及 P - Δ 曲线

表2为十字形试件右侧峰值承载力的实测值和有限元计算结果的对比,计算值与实测值之比的平均值为0.98,标准差为0.128。结合图3分析可知:试件屈服前,P-Δ曲线与试验实测骨架曲线吻合良好。试件屈服后,由于有限元分析采用单调加载方式,未能模拟试验往复加载中的损伤累积,加之试件尺寸误差、材料变异等因素,使有限元计算得到的峰值荷载略大于实测荷载,且有限元曲线未能得到曲线的下降段,但两者整体趋势符合较好。

表 2 峰值抗弯承载力试验值与有限元计算值(右侧)

Table 2 The comparison of tested and theoretical flexural capacity in peak value(right)

试件	加载方向	实测值/ (kN·m)	计算值/ (kN·m)	计算值/ 实测值
CFST-1	正向	117.82	112.13	0.95
	负向	147.25	109.8	0.75
CFST-2	正向	131.24	133.14	1.01
	负向	134.62	133.39	0.99
CFST-3	正向	134.95	126.13	0.93
	负向	136.99	134.67	0.98
CFST-4	正向	152.18	144.17	0.95
	负向	153.22	144.21	0.94
CFST-5	正向	152.74	148.27	0.97
	负向	169.09	148.41	0.88
CFST-6	正向	149.34	173.49	1.16
	负向	138.33	173.81	1.26
平均值				0.98
标准差				0.128

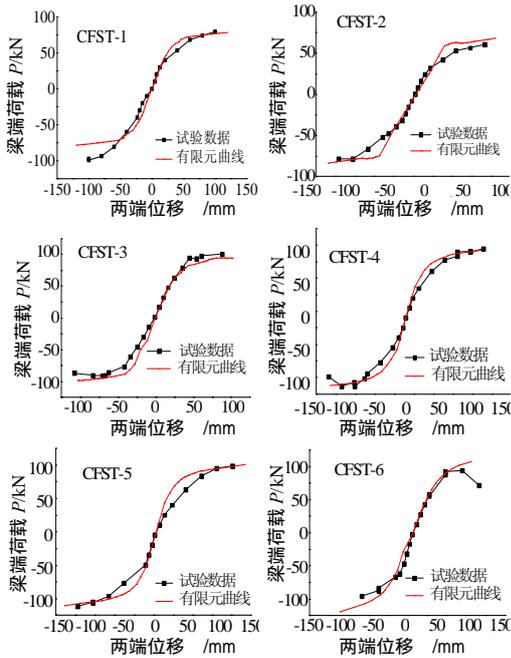


图3 梁端荷载与位移骨架曲线对比(右侧)

Fig. 3 The comparison of $P-A$ skeleton curve (right)

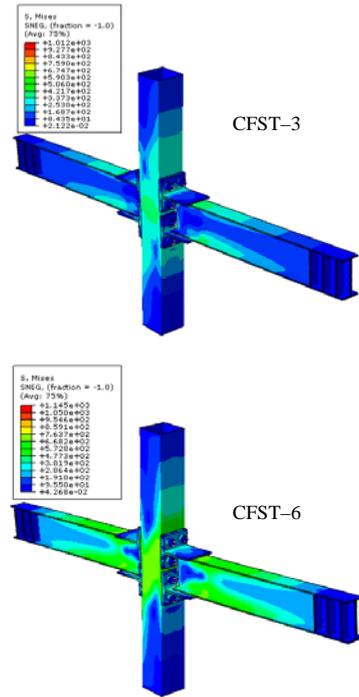


图4 节点钢材部分应力分布

Fig. 4 Distribution of stress in joints of steel

2.3 节点钢材应力分布

对试件在峰值荷载作用下钢材部分的 Von Mises应力云图进行分析可知:试件节点域附近的应力云图基本呈对角线分布,节点域受水平剪切作用明显,而钢材部分的最大应力均出现在穿心螺栓处;钢梁的屈曲变形均出现在T形件腹板与钢梁的焊缝连接处;CFST-3试件节点核心区柱钢管呈现“S”形剪切变形,对比CFST-6试件后,可知在轴压比、穿心螺杆相同的情况下,柱壁厚度较薄的试件其核心区更易出现屈曲(图4)。

2.4 方钢管混凝土柱应力分布

2.4.1 方钢管应力分布

分析方钢管在峰值荷载作用下钢材的 Von Mises应力云图(图5),可知:5 mm柱壁厚度的试件,其柱管应力均达到屈服值,核心区部位有明显屈曲,而10 mm柱壁厚度的试件柱钢管的整体应力水平较低,均未达到屈服应力;试件CFST-1和CFST-2

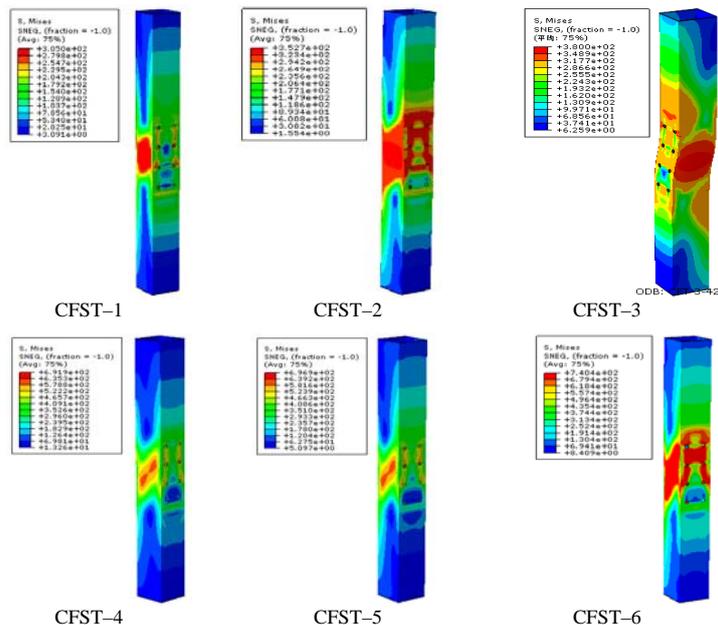


图5 方钢管应力云图

Fig. 5 Distribution of stress in square steel tube

钢管应力的分布差别加大，试件CFST-4和CFST-5钢管应力分布十分相似，表明轴压比相同时，钢管壁厚对构件受力性能有较明显的影响。试件CFST-3和CFST-6核心区应力较大，说明T形件翼缘厚度以及螺杆对方钢管的应力有较大影响。

2.4.2 混凝土柱应力分布

综合分析试件在峰值荷载作用下柱内混凝土主应力云图(图6)，可知：混凝土的拉压主应力整体上关于X轴呈反对称分布，最大主拉力或主压应力均出现在沿T形件翼缘高度方向的端部位置。离节点域越远主应力值越小，在节点域处与水平方向基本呈45°左右倾斜的带状分布，节点域混凝土符合“斜压杆”力学模型，基本处于纯剪切状态。

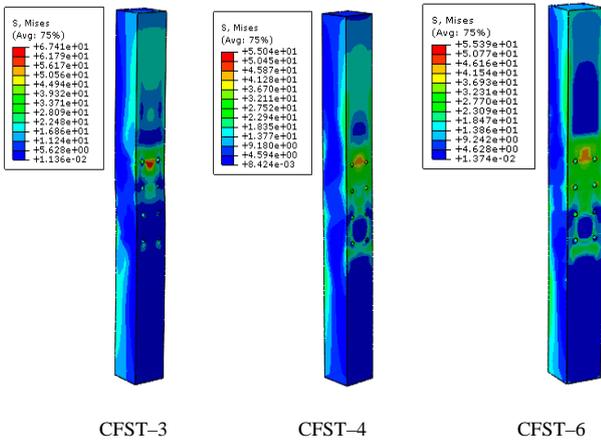


图 6 组合柱混凝土应力云图

Fig. 6 Distribution of stress in composite column concrete

2.5 T形件翼缘的应力分布

T形件翼缘的应力分布云图如图7。通过分析可

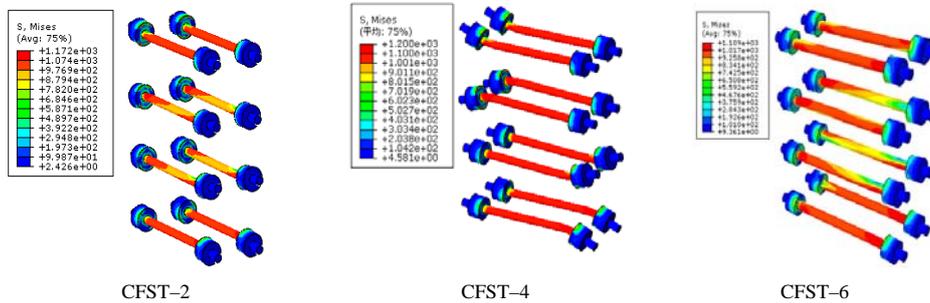


图 8 穿心螺栓应力分布云图

Fig. 8 Distribution of stress in bolts

3 结论

通过分析得到荷载 - 位移曲线在试件屈服前与试验实测骨架曲线吻合良好，说明运用有限元分

析可以预测节点的初始转动刚度和屈服荷载等关键性能参数；试件屈服后，有限元分析结果与试验实测情况有所不同，是由于建模过程中对材料性能进行了理想化，并且采用了单调加载方式，未考虑

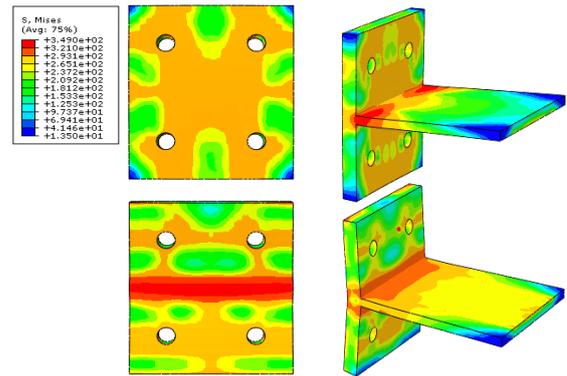


图 7 CFST-6 T形件翼缘表面接触应力变化云图

Fig. 7 Distribution of contact stress in T-stub flanges

2.6 穿心螺栓应力分布

穿心螺栓在峰值荷载下的应力分布云图如图8。分析可知：所有试件的穿心螺栓的最大应力均超过其屈服强度，甚至接近极限强度；由于穿心螺栓螺帽与孔洞之间的挤压作用，最大应力多出现在下部2排穿心螺栓靠近螺帽位置附近，而非螺栓杆中部位置。

试验往复加载中的损伤累积等因素缘故。

分析应力云图可知,柱混凝土在节点域部分的主应力沿对角线呈倾斜的带状分布。另外在穿心螺栓的反向挤压下,位于穿心螺杆孔附近混凝土受局压作用明显。钢管壁厚度对构件受力性能有较明显的影响,轴压比等条件相同的情况下,构件承载能力随管壁厚度增加而有所提高。分析T形连接件翼缘的变形和接触应力分布情况,可知T形件翼缘的厚度对节点的受力性能影响较大,增大T形件翼缘厚度和刚度能提高构件的承载能力。

参考文献:

- [1] 卢平. 方钢管混凝土柱-H型钢梁柱接节点受力性能分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [2] Popov E P, Takhirov S M. Bolted large seismic steel beam to column connections I. Experimental study[J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(12): 1523-1534.
- [3] Takhirov S M, Popov E P. Bolted large seismic steel beam to column connections II. Numerical nonlinear analysis[J]. *Engineering Structure*, 2002, 24(12): 1535-1545.
- [4] 舒兴平, 胡习兵. T形件半刚性连接节点的承载力分析[J]. *钢结构*, 2005, 20(5): 35-40.
- [5] 宋晓光, 申成军, 郭兵. 钢框架梁柱T形件连接滞回性能的研究及设计建议[J]. *钢结构*, 2008, 23(4): 18-23.
- [6] 曹现雷, 郝际平, 申诚君. T形件连接的钢框架梁柱节点在低周往复荷载作用下的抗震性能分析[J]. *钢结构*, 2008, 23(7): 30-33.
- [7] 韩敏, 熊军辉, 郑玉莹, 等. 高强螺栓T形件连接节点三维非线性有限元分析[J]. *徐州建筑职业技术学院学报*, 2009, 9(1): 20-22.
- [8] Hu J W, Kim D K, Leon R T, et al. Analytical studies of full-scale steel T-stub connections using delicate 3d finite element methods[J]. *ISI International*, 2011, 51(4): 619-629.
- [9] Hu J W, Leon R T, Park T. Mechanical modeling of bolted T-stub connections under cyclic loads. Stiffness modeling[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(11): 1710-1718.
- [10] 何益斌, 李毅, 郭健, 等. 中空夹层钢管混凝土柱与钢-混凝土组合梁节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(7): 106-115.
- [11] 何益斌, 黄频, 郭健, 等. 方钢管钢骨混凝土柱与钢梁端板螺栓连接节点抗震性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(7): 116-125.
- [12] 袁峥嵘. 方钢骨混凝土柱-钢梁T形件节点的性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [13] 李毅. 中空夹层钢骨混凝土柱与钢-混凝土梁组合节点的性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- [14] 韩林海, 陶忠, 王文达. 现代组合结构和混合结构-试验、理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 200-206.
- [15] 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 304-328.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立