

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201604007



# 加强型单边螺栓连接节点 静力性能有限元分析

李德山, 王志滨

(福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116)

**摘要:** 以钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓连接节点往复加载试验研究为基础,采用 ABAQUS 软件建立非线性有限元模型,探讨节点核心区构造措施对节点弯矩-转角曲线的影响规律.研究表明:节点核心区外焊槽钢或内置短 H 钢能显著提高节点抗弯承载力;加强型单边螺栓连接节点为半刚性连接、部分强度节点;增大外槽钢厚度、外槽钢强度、内 H 钢厚度、内 H 钢强度均能有效提高节点抗弯承载力.

**关键词:** 钢管混凝土; 钢梁; 单边螺栓; 加强构造; 有限元分析

**中图分类号:** TU 398      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-5013(2016)04-0427-04

## Finite Element Analysis on Static Behavior of Blind Bolted Joints With Reinforcing Components

LI Deshan, WANG Zhibin

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** Based on the cyclic loading experiment of concrete filled steel tubular column (CFST)-steel beam blind bolted joints, nonlinear finite element models were built by ABAQUS software, the influence of reinforcing components on bending moment-rotation curves were discussed. The research results show that, the flexural bearing capacity of the joints can significantly enhanced with welding channel or installing inner H steel. The reinforced joints can be classified as semi-rigid and partial strength connection. The flexural bearing capacity of the joints can be improved with the increase of the thickness or the strength of channel steel, the similar effect can be achieved by increasing the thickness of inner H steel or increasing the strength of inner H steel.

**Keywords:** concrete filled steel tubular column; steel beam; blind bolt; reinforcing components; finite element analysis

近年来,螺栓连接节点受到研究工作者的广泛关注,相对于焊接连接,螺栓连接具有施工方便和连接质量可靠等优点,具有良好的工程应用前景<sup>[1-2]</sup>.单边螺栓作为一种新型紧固件,可以从钢管外侧进行单边拧紧,施工操作方便,解决了普通螺栓难以在闭合截面中应用的缺点,是连接钢管混凝土柱与钢梁的一种有效方法.目前,已有一些学者针对该类新型节点开展了研究工作,现有研究表明,钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓连接节点抗震性能良好,节点一般为半刚性连接<sup>[3-6]</sup>.对于单边螺栓连接节点,钢管壁通常为节点的薄弱区域,管壁在螺栓拉力作用下容易发生较大的面外变形,节点抗弯承载力及初始转动刚度较低.针对上述问题,Wang 等<sup>[7]</sup>提出相应加强构造措施,节点核心区焊接槽钢或者内置短 H 钢能显著提高节点抗弯承载力及耗能能力.本文在相关试验研究的基础上,采用 ABAQUS 软件建立有限

**收稿日期:** 2015-12-21

**通信作者:** 王志滨(1979-),男,副教授,博士,主要从事组合结构的研究. E-mail:wangzhibin@fzu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51308124)

元模型,探讨核心区构造措施对节点力学性能影响规律.

1 有限元模型的建立

1.1 材料本构模型

高强螺栓应力-应变关系采用双折线模型,软钢应力-应变关系采用二次塑流五段线模型<sup>[8]</sup>,混凝土受压应力-应变关系采用方钢管混凝土本构模型,具体数学表达式详见文献[8],混凝土受拉软化性能采用能量破坏准则定义.

1.2 网格划分及接触关系

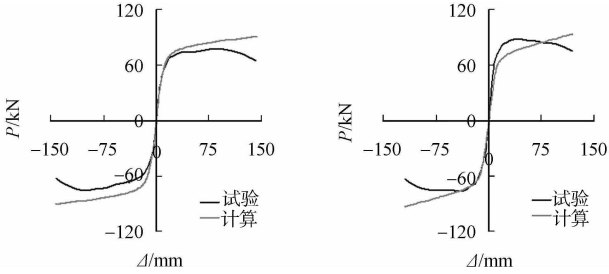
钢梁采用缩减积分壳单元 S4R 模拟,节点的其他部件采用六面体非协调实体单元 C3D8I 模拟. 有限元模型主要接触对包括:钢管与混凝土、钢管与端板、螺栓与钢管、螺栓与端板、螺栓与混凝土、螺栓与外槽钢或内 H 钢、内 H 钢与钢管、内 H 钢与混凝土. ABAQUS 中各接触对界面法线方向采用硬接触模拟,界面切向力学行为采用库伦摩擦模型,摩擦系数均取 0.3. 钢梁与端板的焊接关系、外槽钢与钢管的焊接关系均采用绑定约束 TIE 模拟.

1.3 荷载及边界条件

首先,采用 ABAQUS 中 Bolt Load 对单边螺栓施加预紧力;然后,在柱端施加轴压荷载;最后,在梁端施加横向荷载,采用位移加载模式进行计算,钢管混凝土柱两端边界条件为铰接.

1.4 有限元模型验证

基于文献[7]中 2 个钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓连接节点的荷载( $P$ )-位移( $\Delta$ )滞回曲线的骨架线,对有限元模型进行必要的验证. 有限元计算结果与试验结果的对比,如图 1 所示. 单调加载模拟获得的曲线与节点“ $P$ - $\Delta$ ”滞回曲线骨架线吻合良好,验证了有限元模型的合理性和计算精度.



(a) 外焊槽钢节点 (b) 内置短 H 钢节点

图 1 节点荷载-位移曲线对比

Fig. 1 Comparison of load-displacement curves

2 参数分析

基于工程常用参数范围,设计典型中间层中柱节点,探讨单调静力加载条件下关键参数对节点力学性能的影响规律. 为进行力学性能对比,设计无构造措施节点、核心区外焊槽钢节点及核心区内置短 H 钢节点.

方钢管混凝土柱截面尺寸为  $400\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ,柱高为  $3\ 800\text{ mm}$ ;钢梁截面尺寸为  $400\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ,钢梁跨度为  $6\ 000\text{ mm}$ ;平齐式端板截面尺寸为  $430\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 18\text{ mm}$ . 对于加强型节点,单边螺栓采用 8.8 级 HB 20-2 型 Holo Bolt;对于无构造措施节点,单边螺栓采用 8.8 级 HB 20-1 型 Holo Bolt. 两种型号的螺栓区别在于螺杆长度不同,相应能夹紧的钢板厚度也不同,螺栓具体尺寸参见文献[9]. 外槽钢长度为  $430\text{ mm}$ ,厚度为  $10\text{ mm}$ ;内 H 钢截面尺寸为  $380\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ,长度为  $430\text{ mm}$ ;节点钢材强度均取为 Q345;核心混凝土强度等级为 C60;柱轴压比  $n = N/N_u = 0.4$ ,其中,  $N$  为柱端轴压力;  $N_u$  为无构造措施钢管混凝土柱稳定极限承载力.

整体节点有限元模型示意图,如图 2 所示. 实际计算分析时,采用 1/4 模型进行计算,在模型两个对称面上施加对称边界条件. 首先,对单边螺栓施加预紧力;其次,在钢管混凝土柱端施加轴压力;最后,在梁端施加同向单调荷载,钢管混凝土柱两端边界条件为铰接.

节点弯矩( $M$ )-转角( $\theta$ )曲线对比,如图 3 所示. 由图 3 可知:单边螺栓连接节点具有良好的转动能力,延性较好;节点无构造措施时,抗弯承载力较低,节点核心区外焊槽钢或内置短 H 钢显著提高节点抗弯承载力;根据 EC3 规范进行节点分类<sup>[10]</sup>,3 种单边螺栓连接节点均为半刚性连接、部分强度节点.

外焊槽钢节点及内置短 H 钢节点破坏模态,如图 4 所示. 由图 4 可知:在梁端横向荷载作用下,平齐式端板与外槽钢或管壁脱开,出现明显间隙;外焊槽钢或内置短 H 钢两种构造措施均有效提高节点

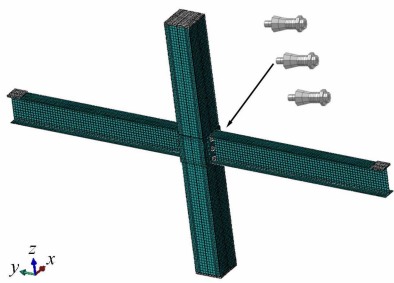


图 2 节点有限元模型

Fig. 2 Finite element model of connection

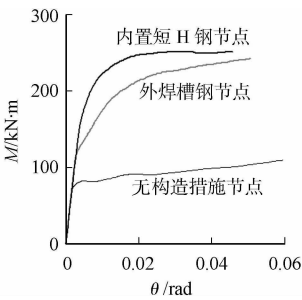
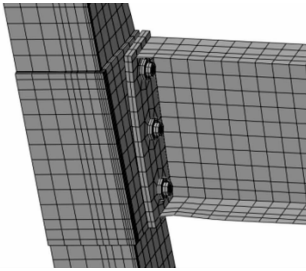


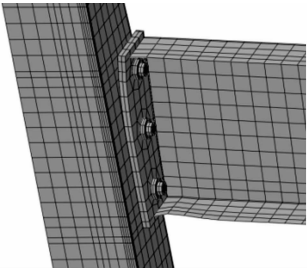
图 3 节点弯矩-转角曲线对比

Fig. 3 Comparison of moment-rotation curves

核心区整体性,管壁稳定性得到较大提高,管壁面外变形较小.



(a) 外焊槽钢节点

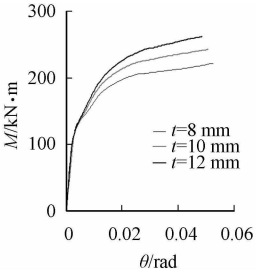


(b) 内置短 H 钢节点

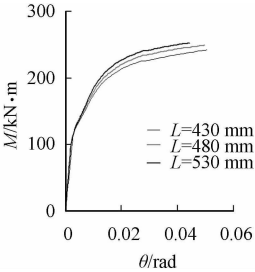
图 4 节点破坏模式

Fig. 4 Failure mode of connections

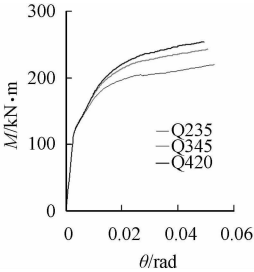
各参数对节点弯矩( $M$ )-转角( $\theta$ )曲线影响,如图 5~7 所示.轴压比对加强型节点弯矩( $M$ )-转角( $\theta$ )曲线影响,如图 8 所示.



(a) 外槽钢厚度



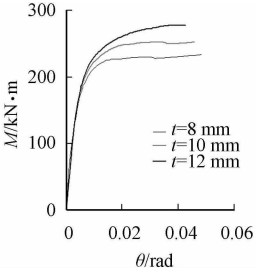
(b) 外槽钢长度



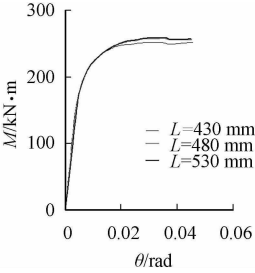
(c) 外槽钢强度

图 5 外焊槽钢节点参数分析

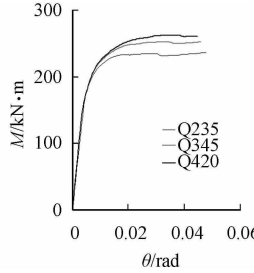
Fig. 5 Parameter analysis of outer channel connection



(a) 内 H 钢厚度



(b) 内 H 钢长度



(c) 内 H 钢强度

图 6 内置短 H 钢节点参数分析

Fig. 6 Parameter analysis of inner H steel connection

由图 5~7 可知:节点抗弯承载力随外槽钢或内 H 钢厚度的增大而提高.这主要因为节点核心区设置构造措施之后,钢管局部稳定性得到较大提高,同时,钢管对核心区混凝土的约束效果也明显增大;增大外槽钢或内 H 钢强度,节点抗弯承载力也呈现逐渐增大的趋势;外槽钢长度、内 H 钢长度、内 H 钢宽

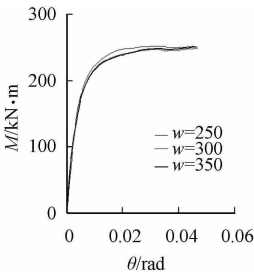
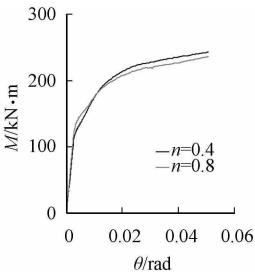
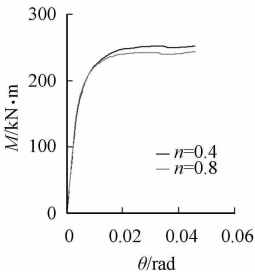


图 7 内置短 H 钢宽度参数分析

Fig. 7 Parameter analysis of inner H steel width



(a) 外焊槽钢节点



(b) 内置短 H 钢节点

图 8 轴压比参数分析

Fig. 8 Parameter analysis of axial compression ratio

度对节点弯矩( $M$ )-转角( $\theta$ )曲线影响不明显.

由图 8 可知:轴压比对节点力学性能影响很小,说明节点核心区设置构造措施之后,管壁稳定性增强,即使在高轴压比条件下,节点仍表现出良好、稳定的力学性能.

3 结论

- 1) 单边螺栓连接节点具有良好的延性;加强型节点属于半刚性连接、部分强度节点.
- 2) 节点外焊槽钢或内置短 H 钢能大幅度增强核心区整体性,有利于各组件协同工作,提高节点力学性能.
- 3) 外槽钢长度、内 H 钢长度、内 H 钢宽度对节点力学性能影响不明显;节点抗弯承载力随着外槽钢厚度、外槽钢强度、内 H 钢厚度、内 H 钢强度的提高而逐渐增大.
- 4) 轴压比对节点弯矩-转角曲线影响很小,即使在高轴压比条件下,节点仍表现出良好、稳定的力学性能.

参考文献:

[1] 李国强,石文龙,王静峰.半刚性连接钢框架结构设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:1-14.

[2] 王燕.钢结构半刚性连接设计理论及其工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2011:11-12.

[3] LOH H Y,UY B,BRADFORD M A. The effects of partial shear connection in composite flush end plate joints part I : Experimental study[J]. Journal of Constructional Steel Research,2006,62(4):378-390.

[4] THAI H T,UY B. Finite element modelling of blind bolted composite joints[J]. Journal of Constructional Steel Research,2015,112(9):339-353.

[5] WANG Jingfeng,HAN Linhai,UY B. Behaviour of flush end plate joints to concrete filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research,2009,65(4):925-939.

[6] WANG Jingfeng,HAN Linhai,UY B. Hysteretic behaviour of flush end plate joints to concrete filled steel tubular columns[J]. Journal of Constructional Steel Research,2009,65(8):1644-1663.

[7] WANG Zhibin,TAO Zhong,LI Deshan,et al. Cyclic behaviour of novel blind bolted joints with different stiffening elements[J]. Thin-Walled Structures,2016,101(4):157-168.

[8] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2007:66-111.

[9] Lindapter International Ltd. Type HB-Hollo-Bolt cavity fixing 2[R]. West Yorkshire:[s. n. ],2011:41-44.

[10] European committee for standardisation. Eurocode 3: Design of steel structures-part 1-8: Design of joints[S]. Brussels:[s. n. ],2005:54-59.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)