

文章编号:1671-6833(2015)05-0058-05

# 带外套管钢管混凝土柱与钢梁节点力学性能研究

刘 坚<sup>1</sup>, 高 奎<sup>1</sup>, 周观根<sup>2</sup>, 陈 原<sup>1</sup>

(1. 广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 浙江东南网架股份有限公司, 浙江 杭州 311209)

**摘 要:** 在总结以往钢管混凝土柱与钢梁连接节点不足的基础上, 提出了新型带外套管式钢管混凝土柱与钢梁单边螺栓连接节点, 通过已有的试验研究和理论分析, 考虑构件的初始几何缺陷和混凝土的塑性损伤本构, 在与试验对比后, 分别建立了带和不带外套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的有限元模型. 通过对模型进行单调加载, 分析节点的破坏和工作机理; 然后对节点进行参数分析, 总结出影响节点初始刚度和承载力的主要因素; 提出外套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的  $M-\theta_r$  实用模型. 结果表明: 带外套管式钢管混凝土-钢梁端板连接节点具有更大的初始刚度、承载力, 提出节点的  $M-\theta_r$  曲线实用计算方法与有限元计算出的  $M-\theta_r$  曲线吻合较好, 研究将为外套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点在实际工程中的应用提供参考.

**关键词:** 外套管; 钢管混凝土柱-钢梁连接节点;  $M-\theta_r$  实用模型; 力学性能

**中图分类号:** TH133.4 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.013

## 0 引言

钢管混凝土以其优越的性能广泛应用于工程实际中<sup>[1]</sup>. 近年对钢管混凝土柱-钢梁半刚性连接研究比较多的是穿芯螺栓端板式连接, 试验和理论分析表明这种连接方式具有良好的抗震性能<sup>[2-4]</sup>, 不足是这种节点构造比较复杂, 节点在实际应用过程中不仅受截面形式的影响, 而且要在钢管混凝土柱各个方向同时连接钢梁, 施工比较困难. 单边螺栓的出现较好地解决了这一问题, 众多试验表明: 单边螺栓钢管混凝土柱节点, 具有较好的承载能力和抗震性能<sup>[5-6]</sup>. 然而内置在钢管内的螺栓缺少与混凝土的锚固, 节点域内的钢管柱壁由于受到螺栓的拉力作用会发生明显的外凸变形<sup>[3]</sup>, 这不仅降低了节点的承载能力, 而且钢管柱壁的破坏将加速整体结构破坏, 阻碍了单边螺栓连接的钢管混凝土柱-钢梁连接节点进入工程实践. 一些学者提出了如多样式模型、B3 样条模型等半刚性节点的  $M-\theta_r$  曲线计算模型<sup>[7]</sup>, 这些模型都是针对型钢柱与钢梁半刚性连接节点的, 对钢管混凝土柱钢梁半刚性节点  $M-\theta_r$  计算

模型研究较少.

为解决上述问题, 从加强节点域钢管柱壁的角度出发, 提出了新型外套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点, 与以往的单边螺栓钢管混凝土柱-钢梁连接节点不同的是在节点域的钢管柱壁外套一个加强管, 其目的是保护节点域钢管柱壁, 防止其在受力的情况下外凸变形. 通过对提出的新型外套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点建立有限元模型, 进行单调加载, 与不加外套管的钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点进行对比, 分析外套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点的破坏和损伤机理, 并针对此连接方式提出实用的  $M-\theta_r$  模型, 为此类新型节点在实际工程应用提供参考.

## 1 新型节点的设计、建模与验证

### 1.1 节点试件设计

为更深入地分析带外套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的静力性能, 分别建立带外套管式和不带外套管式圆钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点的分析模型, 编号为 ECD1、

收稿日期:2015-06-02; 修订日期:2015-07-30

基金项目: 住宅和城乡建设部科技计划项目(2012-k2-8); 广东省教育厅科技创新项目(2012-KJ CX-0084); 浙江东南网架股份有限公司横向项目(SM-0716-01)

作者简介: 刘坚(1964—), 男, 广州大学教授, 博士, 主要从事钢结构、钢与砼混(组)合结构研究, E-mail: 787196372@qq.com.

ECD2. 钢管混凝土柱截面为圆形截面,直径为 200 mm,厚度为 8 mm,柱高 1 600 mm;钢梁截 H300 mm×150 mm×6 mm×10 mm,梁长为 1 600 mm;试件端板厚度均为 18 mm;每个节点的连接处均设置 4 排 2 列;ECD1 节点试件外套管厚度为 18 mm;螺栓节点连接螺栓采用 M24 高强螺栓;钢管混凝土柱轴压比取 0.2.

1.2 有限元建模

有限元模型中钢材和螺栓的本构关系均采用双线性随动强化准则,强化阶段弹性模量设为 0.01E;混凝土本构采用文献[8]提出的等效应力-应变关系模型;所有组件均采用八节点一阶线性减缩积分格式的三维实体单元(C3D8R);各构

件之间均采用 Coulomb 摩擦模型,并考虑界面粘结的影响.柱翼缘与端板、螺栓、螺栓与端板之间的摩擦系数均取 0.45.

1.3 试验验证

为验证材料模型、界面接触及单元类型对分析钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点的适用性,对文献[9-10]中不带外套管单边螺栓节点试件 CJM1、MES1 进行有限元模拟,计算结果与试验结果对比见图 1.从图 1 中可以看出有限元模拟结果值比试验值稍大,误差范围在 3% 以内,在允许范围内.证明有限元建模方法可靠合理.

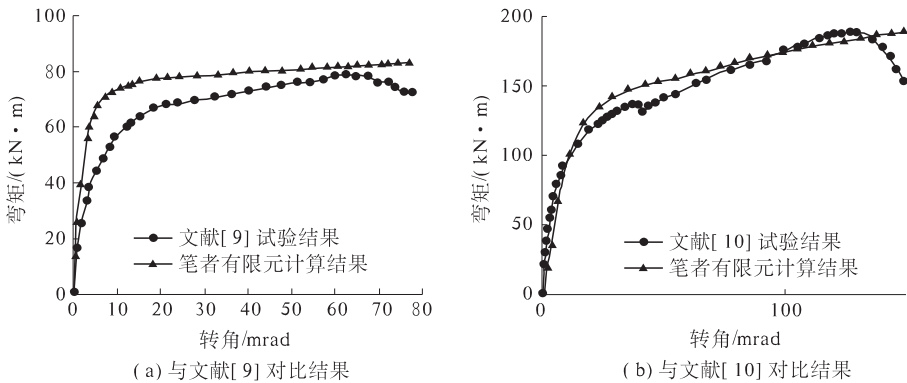


图 1  $M-\theta_r$  曲线的非线性有限元分析结果和试验结果进行对比

Fig.1 Comparison between moment versus rotation curves predicted by FEM and tests

2 单调荷载下新型节点的破坏和工作机理研究

对 2 个有限元分析模型梁进行梁端单调加载,加载位移为 120 mm,详细研究了节点荷载一位移变形的全过程.带外套管式和不带外套管式钢管混凝土柱钢梁连接节点试件的应力云图和钢管的应力云见图 2.从图 2 中可以看出试件 ECD1 端板基本没有变形,节点域钢管柱壁没有发生平面外变形,钢梁下翼缘鼓曲明显;试件 ECD2 端板脱离柱壁,节点域钢管柱壁发生轻微的平面外变形,钢梁下翼缘鼓曲明显;计算得出试件 ECD1 节点初始刚度和极限承载力为 58 kN·mm/mrad、500 kN·mm,试件 ECD2 节点初始刚度和极限承载力为 53.2 kN·mm/mrad、450 kN·mm.

通过对 2 个节点试件的变形状况分析,可以得到外套管在单边螺栓钢管混凝土柱-钢梁连接节点中所起的主要作用有:①保护节点域钢管柱壁,防止其发生平面外变形,降低节点的承载能力;②减小端板变形,保证节点域不发生较大的剪

切变形;③保证节点破坏发生在梁端,使其达到“强连接,弱构件”的要求;④提高连接节点的初始刚度和承载力.

3 外套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点参数化研究

对新型节点进行参数分析,分析参数包括端板厚度( $t_{ep}$ )、钢材屈服强度( $f_y$ )、截面含钢率( $\sigma$ )、外套管厚度( $t_c$ ).图 3 为不同参数下节点的  $M-\theta_r$  曲线.从图 3(c)可以得到截面含钢率对新型节点初始刚度和极限承载力影响不大;从(a)、(d)可以看出随着端板和外套管厚度增加,节点的初始刚度和极限承载力也有一定的提高,当端板厚度和外套管厚度达到一定程度时,再加大端板和外套管的厚度,该节点的初始刚度和承载力不再增加;从图 3(b)可以得到,钢材的屈服强度是影响该节点承载力的最重要因素,随着钢材屈服强度增加,该节点的承载力增加比较明显.

由于外套管对新型节点域钢管柱壁的约束作用,且柱的线刚度远大于梁,加载位置又设置在梁

端,所以柱截面含钢率对节点的初始刚度和承载力影响不明显;端板厚度较薄时,对梁端进行加载,端板首先屈服,增加端板厚度,新型节点的初始刚度和承载力都提高,端板厚度达到一定程度时,节点屈服首先发生在梁端,再增加端板的厚度,对节点初始刚度和承载力的影响并不明显;外套管在节点域起着环向约束作用,笔者选取的钢

管柱壁较厚,所以增加外套管的厚度,节点的承载力和初始刚度变化不大.由新型节点的破坏模式可知,对于钢管柱壁较薄的节点,增加外套管厚度,必然能提高节点的承载力和初始刚度.在工程实践中应从钢材的屈服强度、端板厚度和外套管的厚度,改善外套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的初始刚度和承载力.

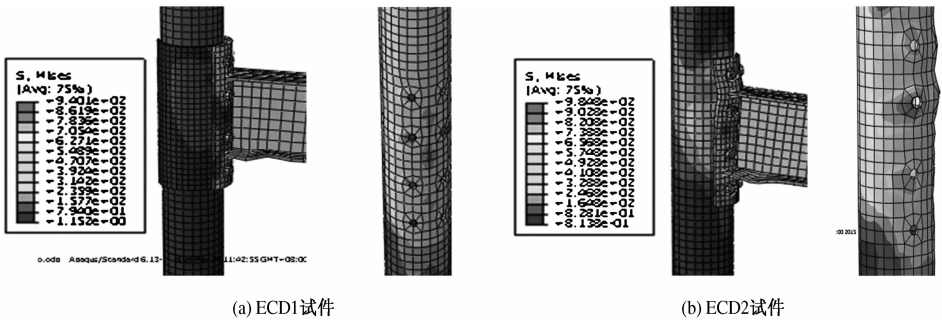


图 2 2 个试件应力云图对比  
Fig. 2 Stress nephograms comparison of specimen

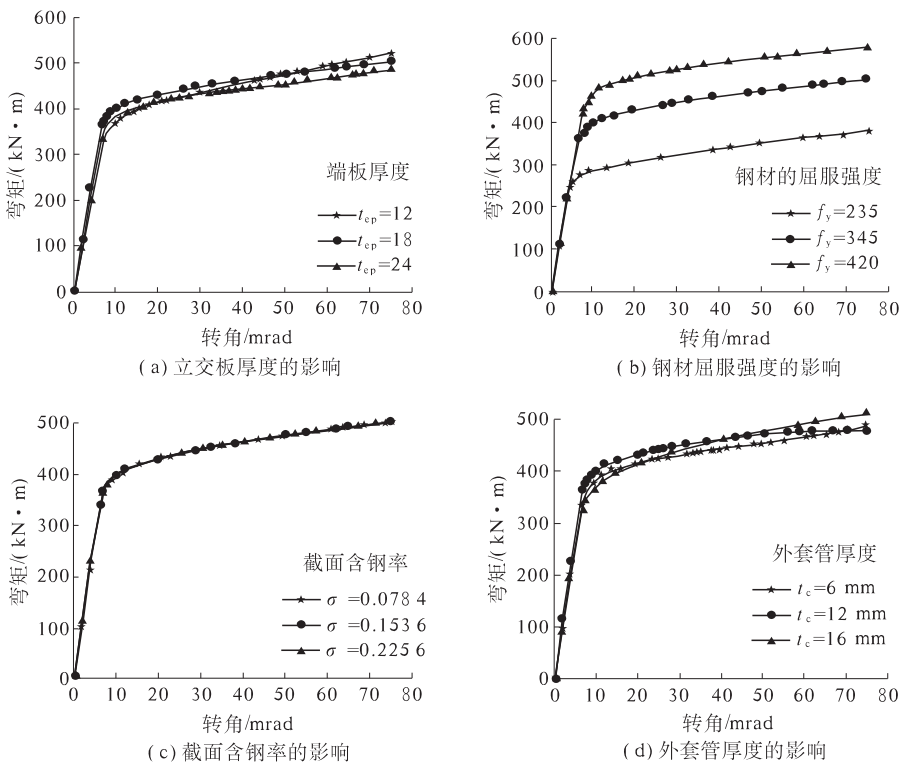


图 3 不同参数下节点  $M-\theta_r$  曲线的对比  
Fig. 3 Comparison of moment versus rotation curves under different parameters

4  $M-\theta_r$  实用模型

虽然有限元分析能够较准确地计算连接弯矩-转角关系曲线,但设计耗时较多,另一方面试验研究又不具有通用性,不便于日常设计应用.描述节点连接弯矩-转角关系常用的方法是通过为大

量试验数据或有限元分析结果进行拟合而提出连接的  $M-\theta_r$  关系模型.

为简化计算过程,笔者选用文献[11]提出的半刚性端板连接节点的  $M-\theta_r$  模型拟合带外套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的  $M-\theta_r$  曲线,其表达形式为

$$M = \begin{cases} k_{in}\theta_r & \theta_r < \theta_p \\ M_{pc} + k_{st}(\theta_r - \theta_p) & \theta_r \geq \theta_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: $M$ 、 $M_{pc}$  分别为节点承受的弯矩和节点塑性弯矩; $\theta_r$  为节点相对转角; $k_{in}$ 、 $k_{st}$  分别为节点初始刚度和强化阶段转动刚度; $\theta_p$  为塑性弯矩对应的节点转角。

(1)新型节点的初始刚度. 节点变形与端板变形、柱翼缘变形、螺栓伸长变形都有关系<sup>[11]</sup>,由于笔者提出的新型节点在节点域有外套管的作用,导致钢管混凝土柱翼缘基本不参与节点变形,所以在外套管厚度确定的情况下计算初始转角时,只考虑端板变形和螺栓伸长变形。

将端板连接简化成  $T$  型件分析可得到  $k_{in}$  与  $\theta_r$  的关系式<sup>[11]</sup>。

$$k_{in} = Fh_1/\theta_r. \quad (2)$$

式中: $F$  为梁翼缘等效轴力。

对于端板引起的转角,在初始阶段,忽略端板外伸处的撬力作用,并认为端板与柱翼缘同步转动,同时将螺栓处端板简化为铰接,梁翼缘作为定向支座,即可求出端板在水平方向的位移,进一步求出端板变形引起的转角为

$$\theta_{ep} = Fe_f^3/(6EI_{ep}h_1). \quad (3)$$

式中: $EI_{ep}$  为端板的抗弯刚度; $h_1$  为梁高; $e_f$  为第一排螺栓孔中心至梁翼缘顶端的间距。

在初始状态下螺栓预拉力未被克服,伸长变形非常小;因钢管混凝土柱的线刚度非常大,变形

也很小. 利用已经分析的结果,进行回归计算,得到节点总转角为

$$\theta_r = 1.1\theta_{ep}. \quad (4)$$

将式(3)、(4)、(5)带入式(2),得到带套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的初始刚度为:

$$k_{in} = h_1^2/(1.1(e_f^3/(6EI_{ep}))). \quad (5)$$

(2)新型节点塑性弯矩. 钢管混凝土柱框架结构连接节点的抗震设计准则是强节点弱构件,因此,对于合理的节点设计,节点塑性弯矩不会小于梁截面塑性弯矩,所以为方便起见,可近似取

$$M_{pc} = M_{pb}. \quad (6)$$

(3)新型节点强化阶段转动刚度. 强化阶段转动刚度,根据本文第 3 节,节点试件参数分析统计可得

$$k_{st} = 0.01k_{in}. \quad (7)$$

综上可得外套管式钢管混凝土柱-钢梁端板连接节点的  $M-\theta_r$  曲线公式为

$$M = \begin{cases} k_{in}\theta_r & , (\theta_r \leq \theta_p) \\ M_{pb} + 0.01k_{in}(\theta_r - \theta_p) & , (\theta_r > \theta_p) \end{cases} \quad (8)$$

利用式(8)分别对比了单调加载下外套管厚度为 18 mm 和 12 mm 的节点模型的  $M-\theta_r$  曲线,对比结果如图 4. 从图 4 可以得到有限元计算结果和公式计算结果的对比除强化段承载力和刚度有少许出入外,两者计算结果基本吻合,拟合的  $M-\theta_r$  曲线满足要求。

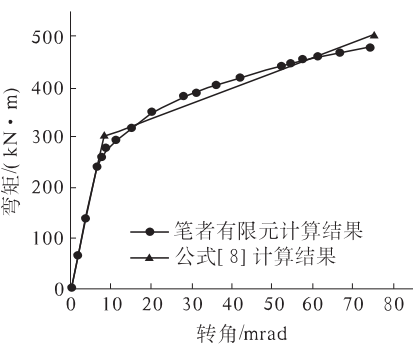
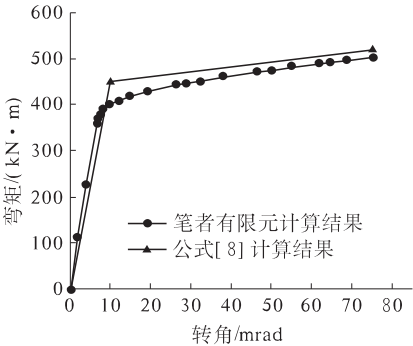


图 4  $M-\theta_r$  公式计算曲线和非线性有限元计算曲线的比较

Fig. 4 Comparison between moment versus rotation curves predicted by formula and finite element

5 结论

(1)外套管式钢管混凝土柱与钢梁单边螺栓端板连接新型节点由于外套管的存在,很好地保护了节点域钢管柱壁,使带套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点在受力过程中,节

点域钢管柱壁不会发生较大的外凸变形,避免导致整个节点连接处损坏。

(2)与不带套管单边螺栓端板连接节点对比,带套管式钢管混凝土柱-钢梁单边螺栓端板连接节点具有更高的初始刚度和抗弯承载能力。

(3)端板厚度、钢材屈服强度、外套管厚度是

影响新型节点初始刚度和承载力最重要的因素,所以改善节点的初始刚度和承载力应从这三方面入手。

(4)根据大量的参数分析,提出新型节点的  $M-\theta_r$  实用模型,实用模型计算结果与有限元分析结果吻合较好,可以为这种新型节点形式的工程实际提供参考。

## 参考文献:

- [1] 刘坚. 钢与混凝土组合结构设计原理[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [2] 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.
- [3] 王先铁,郝际平. 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):33-37.
- [4] 马尤苏夫,王先铁. 穿芯高强螺栓-端板节点方钢管混凝土框架抗震性能数值分析[J]. 工程力学,2015,32(2):154-162.
- [5] 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.
- [6] 王静峰,张琳. 半刚性钢管混凝土框架梁柱端板连接抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2012,45(11):14-21.
- [7] 刘坚 著. 钢结构高等分析的三阶非线性理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [8] 刘威. 圆钢管混凝土柱-钢梁外环板式框架节点抗震性能研究[D]. 北京:清华大学土木工程学院,2011.
- [9] WANG Jing-feng, HAN Lin-hai, UY B. Hysteretic behavior of flush end Plate joints to concrete-filled steel tubular columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(8/9):1644-1663.
- [10] 陈莉萍. 半刚性钢管混凝土框架端板连接节点静力试验和理论研究[D]. 合肥:合肥工业大学土木工程学院,2010.
- [11] 顾强. 钢结构滞回性能及抗震设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

## Study on Mechanical Performance of Outer-shell Connections for Concrete Filled Steel Tubular Column and Steel Beam

LIU Jian<sup>1</sup>, GAO Kui<sup>1</sup>, ZHOU Guan-gen<sup>2</sup>, CHEN Yuan<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Zhejiang Southeast Space Frame Co., Ltd., Hangzhou 311209, China)

**Abstract:** The unilateral bolt connection nodes of new type concrete filled steel tubular columns with outer shell and steel beam was put forward by summing up the previous deficiency of connection nodes. Based on the experimental and theoretical analysis, in consideration of the initial geometric imperfections of steels and concrete damaged plasticity model, end-plate connections for concrete filled steel tubular columns and steel beam with outer-shell and without outer shell finite element models were established respectively. Under monotonic loading in finite element model, analysis the damage and working mechanism; according to parametric study analysis the main factors of initial stiffness and bearing capacity for joints and establish  $M-\theta_r$  practical model for new type joints. The results show that the joints with outer-shell have greater initial stiffness and bearing capacity and better seismic performance. The  $M-\theta_r$  models which was presented in this paper are reasonable and reliable. It can provide a reference for theory design and real engineering application.

**Key words:** outer-shell; connections of concrete filled steel tubular columns to steel beam; practical moment versus rotation model; mechanical performance