

# T形方颈单边螺栓连接梁柱节点抗弯承载力的扩大化参数分析\*

刘泉维<sup>1</sup> 孙乐乐<sup>2,3</sup> 叶守杰<sup>1</sup> 王培军<sup>3</sup> 侯钢领<sup>2</sup>

(1. 青岛地铁集团有限公司, 山东青岛 266000; 2. 哈尔滨工程大学烟台研究院, 山东烟台 264003; 3. 山东大学土建与水利学院, 济南 250061)

**摘要:** 采用有限元数值模拟的方法对T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点抗弯承载力分析模型和计算公式进行了扩大化参数分析,以填补试验研究未考虑参数的空缺,验证了理论分析模型的可靠性和准确性。结果表明: 1)所建立的节点三维有限元模型不仅能够准确预测节点在单调荷载下的破坏模式、各部件受力状态和屈服顺序,还能得到与试验结果吻合度较高的节点转角-弯矩关系曲线,具有较高的准确度和可靠性; 2)节点抗弯承载力理论计算值与有限元值之间的误差基本保持在15%之内,仅有个别节点的误差较大,但是不超过40%。此外,理论公式对节点峰值承载力的预测结果优于屈服承载力; 3)从破坏模式来看,47.1%的节点被完全准确预测,47.1%的节点被部分成功预测,仅有5.8%的节点预测错误。考虑到节点构造的复杂性及各组件分析模型简化等方面的影响,认为这种程度的承载力预测误差和破坏模式预测误差是可以接受的。

**关键词:** T形方颈单边螺栓; 方钢管柱; 梁柱节点; 抗弯承载力; 有限元分析

## 0 引言

栓接是钢结构连接形式之一,是指通过螺栓紧固件连接钢构件的施工技术或工艺。与焊接相比,栓接不受现场环境影响,施工进度可控,不需要专业的焊接设备和技术工人,降低了对施工现场的技术要求<sup>[1]</sup>。此外,栓接可以实现半刚性连接,提高节点变形能力,赋予结构更优的抗震性能<sup>[2]</sup>。然而,传统螺栓连接在闭口截面钢构件的连接中难以实现。为解决这一问题,单边螺栓概念应运而生。

目前,国内外学者已经提出数10种单边螺栓并对其进行了系列的理论分析和试验研究。徐婷等<sup>[3]</sup>回溯了国外单边螺栓20年的发展,详细介绍了其构造组成、安装方法和锚固机理,促进了单边螺栓在国内的研究和应用。陈珂璠等<sup>[4]</sup>收集了国内外结构工程和机械工程领域内的单边螺栓研究成果,分析了不同种类单边螺栓的优势和劣势,最后预言了将会有更多的新型单边螺栓随着装配式建筑的推广而问世。梁晓婕等<sup>[5]</sup>认为虽然目前市面上已有多种单边螺栓,但是针对单边螺栓连接的研究尚不成

熟,仍缺乏相关的设计规范以指导工程实践。

T形方颈单边螺栓是由本课题组提出的一类新型的单侧安装紧固件。与现有单边螺栓相比,T形方颈单边螺栓构造简单、安装便利、无需额外的安装辅助工具,能适应现场粗放的施工方式,具有较大的应用潜力<sup>[6]</sup>,连接副实物及其安装方式如图1所示。针对T形方颈单边螺栓,Wang等<sup>[7-8]</sup>通过T型件-钢管节点在单调荷载和循环荷载下的试验研究、数值模拟和理论分析,总结了T形方颈单边螺栓连接T型件-钢管节点的设计方法,报道了此类单边螺栓的应用潜力。基于Wang等<sup>[7-8]</sup>的研究,Sun等<sup>[6,9]</sup>首次将T形方颈单边螺栓用于足尺梁柱节点

\*国家自然科学基金面上项目(52078280);黑龙江省重点研发计划项目(2022ZX01A14);山东省住房城乡建设科技计划项目(2024KYKF-JZGYH101);烟台市校地融合发展项目(22MZ03CD012);中央高校基本科研业务费项目(3072024JJ2701)。

第一作者:刘泉维,博士,研究员,主要从事装配式结构方面研究工作。

通信作者:孙乐乐,博士,副教授,主要从事装配式钢结构和组合结构抗震研究,lelesun117@hrbeu.edu.cn。

收稿日期:2024-03-17

的连接,并通过模型试验对此类梁柱节点展开了抗弯性能和抗震性能研究。试验结果表明,T形方颈单边螺栓连接节点具有与传统螺栓连接节点相当的初始刚度,并且在整个生命周期内的承载力不低于传统螺栓连接节点的85%。此外,为避免钢管柱连接面在梁端弯矩作用下发生面外变形,Sun等<sup>[10-11]</sup>还针对T形方颈单边螺栓连接梁柱节点提出了双槽钢组件和H钢组件加强方案,并通过模型试验研究了加强节点的结构响应。结果表明,钢管柱内设置H钢组件可以避免钢管柱壁变形和螺栓拔出破坏,显著提高节点的各项力学性能指标。故实际工程中推荐使用外伸H钢组件。

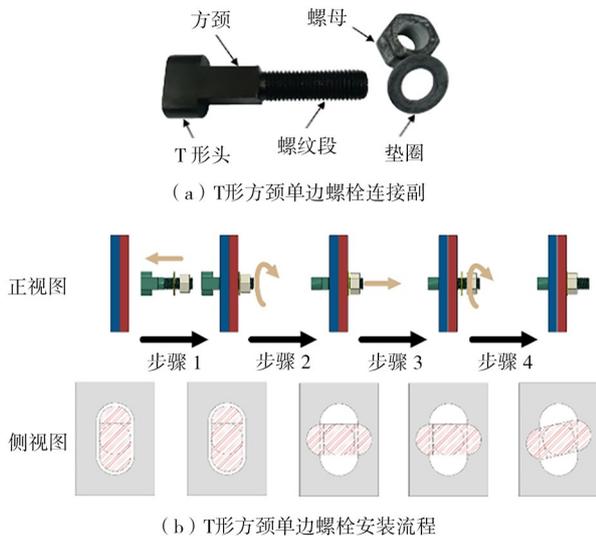


图1 T形方颈单边螺栓构造及用法

Fig. 1 Details and usage of T-head square-neck one-side bolts

广义来讲,Wang等<sup>[7-8]</sup>和Sun等<sup>[6,9-11]</sup>的试验研究和有限元数值模拟均属于“试验”性质的研究,即结构的力学性能必须通过制作试件(建立模型)并施加外力荷载(求解器运算)获得,且一次“试验”仅可获得唯一结果。而理论研究以分析模型和计算公式为载体,可以在短时间内快速获取结构在任意参数组合下的力学性能,这也是结构设计的最终指导办法。针对T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点,虽然Sun等<sup>[6,9]</sup>提出了相应的节点抗弯承载力计算模型及公式,但是仅对有限的试验节点进行了验证复核,参数覆盖范围不足。

为进一步验证文献<sup>[6,9]</sup>所提节点抗弯承载力计算模型的准确性,本文通过有限元数值模拟的方法对其进行了扩大化参数分析。

## 1 有限元模型的建立

### 1.1 几何模型

根据文献<sup>[9]</sup>中相关试验节点的几何信息,通过ABAQUS<sup>[12]</sup>有限元分析软件建立T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点的有限元几何模型,如图2所示。由于本研究中钢梁-钢管柱节点的几何形状、边界条件和荷载条件均具有对称性,因此有限元模型均取1/2以节约计算成本,提高计算精度<sup>[13]</sup>。T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点有限元模型由4个部件组成,分别为钢管柱、钢梁、端板和T形方颈单边螺栓,如图2所示。

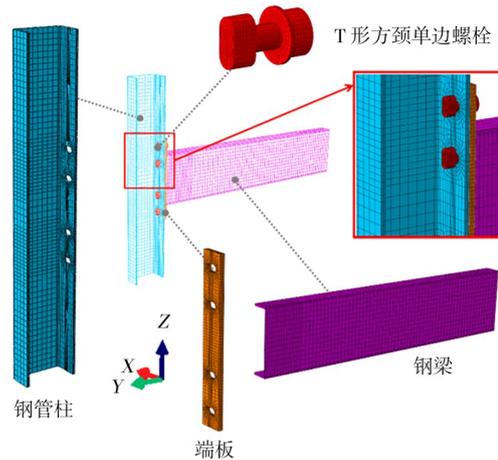


图2 T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点有限元模型

Fig. 2 Finite element model of T-head square-neck one-side bolted beam to SHS column joints

### 1.2 材料本构关系

试件各部件钢材主要为低碳软钢和高强合金钢,其中低碳软钢的应变-应力( $\varepsilon-\sigma$ )本构关系采用五段线模型<sup>[14]</sup>,高强度螺栓由高强合金钢制成,采用双折线模型<sup>[14]</sup>模拟。各材料本构模型参数取文献<sup>[9]</sup>中实测数据。

### 1.3 接触属性

T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点共设置有两类接触,其中端板与钢梁之间通过绑定(Tie)连接定义,T形方颈单边螺栓与端板、钢管柱,端板与钢管柱之间采用面面(Face to Face)接触。在面面接触属性设置中,法向行为采用硬(Hard)接触,即接触对之间可以传递压力,但在拉力作用下会出现接触分离;切向行为采用库仑(Coulomb)摩擦模型,摩擦面抗滑移系数取GB 50017—2017《钢结构设计标准》<sup>[15]</sup>推荐的最小值0.3。

### 1.4 单元类型及网格划分

有限元模型各部件均采用三维八结点一阶缩

减积分单元(C3D8R)。采用C3D8R实体单元的有限元模型在分析过程中存在沙漏现象,会导致结构刚度降低。为减小沙漏现象对计算结果的影响,所有部件的板件厚度方向划分不少于4层的偶数层。本文划分网格后的有限元模型如图2所示,其中各部件网格尺寸经敏感性分析后汇总于表1中<sup>[1]</sup>。

表1 有限元模型的单元类型和网格尺寸

Table 1 Element types and mesh sizes of the finite element model

组件	单元类型	网格尺寸
钢梁	C3D8R	20(全局),5(局部)
端板	C3D8R	5(全局),3(局部)
端板加劲肋	C3D8R	5(全局)
T形方颈单边螺栓	C3D8R	3(全局)
钢管柱	C3D8R	20(全局),5(局部)

### 1.5 边界条件

有限元模型的边界条件设置如图3所示。在钢管柱顶底两端滑动铰支座和固定铰支座的中心处设置参考点RP-1和RP-2,并与钢管柱两端通过耦合(Coupling)约束连接。其中,参考点RP-1在 $x$ 轴和 $y$ 轴方向的线位移被限制,绕 $y$ 轴和 $z$ 轴的转动位移也被限制,模拟滑动铰支座边界;参考点RP-2在三轴方向的线位移均被限制,绕 $y$ 轴和 $z$ 轴的转动位移被限制,模拟固定铰支座边界。由于节点有限元模型为1/2模型,需要在其对称面施加对称边界条件,即限制 $y-z$ 平面内所有单元节点沿 $x$ 轴方向的线位移。

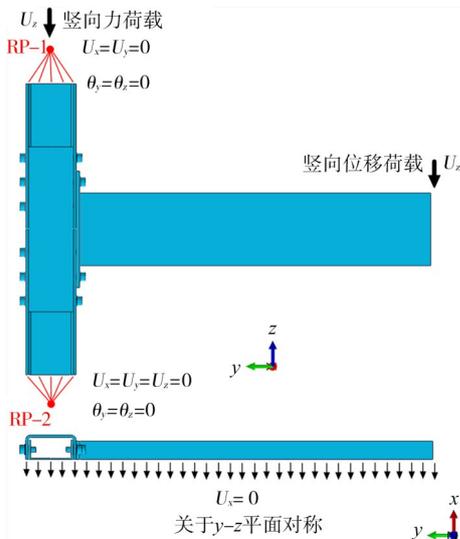


图3 有限元模型的边界和荷载条件

Fig. 3 Boundary and loading conditions of the finite element model

### 1.6 荷载条件

有限元模型的荷载条件包括3部分,依次为施加螺栓预紧力、施加钢管柱轴力和施加节点弯矩。其中,螺栓预紧力通过ABAQUS中的“Bolt load”在Step-1施加,预紧力数值参照GB 50017—2017<sup>[15]</sup>施加,如图4所示;钢管柱顶轴力通过参考点RP-1在Step-2施加;节点弯矩通过钢梁末端截面在Step-3施加,如图3所示。

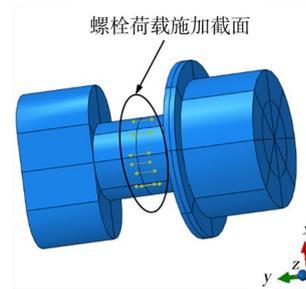


图4 螺栓预紧力示意

Fig. 4 Schematic diagram of bolt preload

## 2 有限元模型的验证

### 2.1 破坏模式

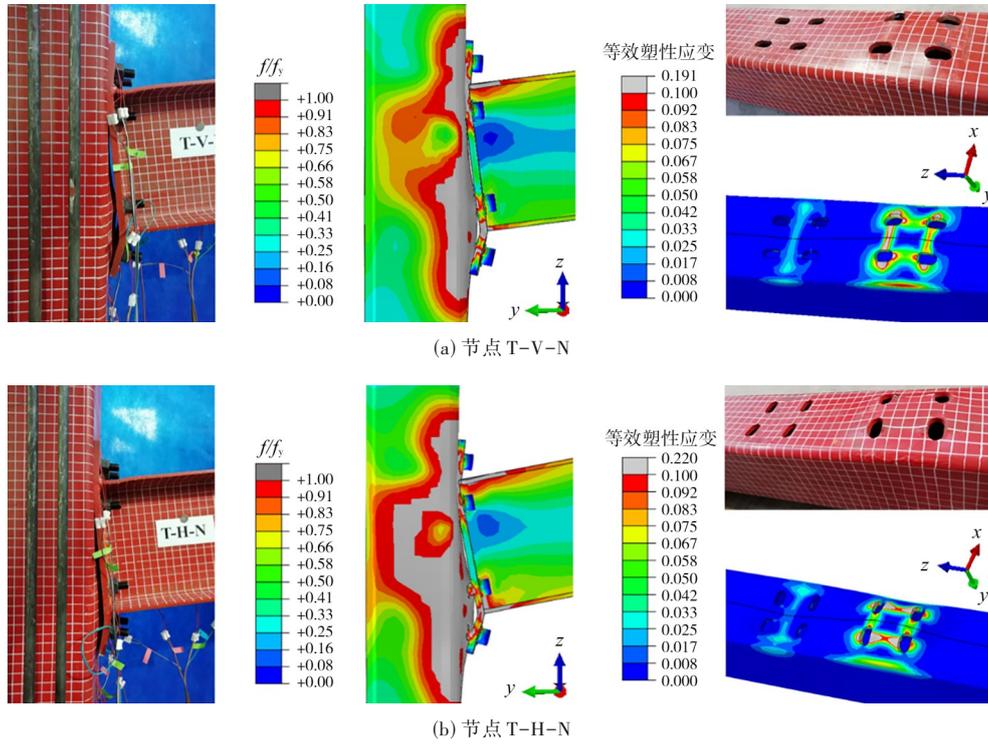
对文献[9]中的2个T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点进行有限元分析,将数值模拟得到的节点破坏模式与试验结果进行对比,如图5所示。可以看出,节点T-V-N(栓孔竖向布置)和T-H-N(栓孔横向布置)的变形集中于钢管柱连接面和端板处。长圆形螺栓孔之间的等效塑性应变在纵横方向并非均匀分布,都表现为螺栓头长轴方向塑性应变较大,这与试验中钢管柱连接面的变形一致。

### 2.2 转角-弯矩关系曲线

根据有限元模型分析结果,提取转角-弯矩关系曲线并与试验所得曲线进行对比,对比结果如图6所示。可以看出,所有节点有限元模型所得曲线的初始刚度均大于试验曲线。这主要是因为有限元模型的几何尺寸、材料本构、边界条件完全理想化,忽略了试件的初始几何缺陷、材料性能缺陷、试件的拼装间隙和与支座间的间隙。有限元模型所得节点屈服强度与试验结果相近,而且屈服后曲线基本重合。

### 2.3 曲线特征值

为对本文所建立有限元模型在单调荷载下的准确性和可靠度进行量化评估,表2列出了2个节点的有限元和试验曲线特征值对比。有限元模型初始刚度 $S_{j,ini}$ 与试验值之间的误差为8.6%~



注:  $f/f_y$  为应力与屈服应力之比。

图5 T形方颈单边螺栓连接节点的破坏模式对比

Fig. 5 Comparisons of failure modes for T-head square-neck one-side bolted joints

22.0%,平均误差为15.4%。与初始刚度相比,有限元模型屈服弯矩  $M_y$  和峰值弯矩  $M_p$  与试验值之间的误差则小很多,分别为-4.4%~-1.8%和-5.3%~2.5%,平均误差为-3.1%和-1.4%。

综上,本文所建立的T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点模型可以准确预测此类连接的结构响应,可以用于进一步的参数化研究中。

### 3 承载力计算模型及公式

T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点的抗弯承载力取钢梁、单边螺栓、端板和钢管柱壁强度控制下节点抗弯承载力的最小值,即:

$$M_{yc} = \min [M_{yc,be}, M_{yc,ep}, M_{yc,co}] \quad (1a)$$

$$M_{pc} = \min [M_{pc,be}, M_{pc,bo}, M_{pc,co}] \quad (1b)$$

式中:  $M_{yc}$  为节点屈服弯矩理论计算值;  $M_{yc,be}$ 、 $M_{yc,ep}$  和

$M_{yc,co}$  分别为钢梁、端板和钢管柱壁强度控制下的节点屈服弯矩;  $M_{pc}$  为节点峰值弯矩理论计算值;  $M_{pc,be}$ 、 $M_{pc,bo}$  和  $M_{pc,co}$  分别为钢梁、单边螺栓和钢管柱壁强度控制下的节点峰值弯矩。

#### 3.1 钢梁强度控制的节点抗弯承载力

##### 3.1.1 屈服承载力

钢梁强度控制下节点抗弯承载力  $M_{yc,be}$  与钢梁相同。考虑钢梁翼缘与腹板材性可能不一致,本文推荐采用欧洲规范 Eurocode 3 Part 1-8<sup>[16]</sup>,其中H形或I形截面热轧钢梁的塑性抗弯承载力可以通过下式求得:

$$M_{yc,be} = A_{b,f} f_{y,f} (h_w + t_{b,f}) + 0.25 A_{b,w} f_{y,w} h_w \quad (2)$$

式中:  $A_{b,f}$ 、 $f_{y,f}$  和  $t_{b,f}$  分别为钢梁翼缘截面积、屈服强度和厚度;  $A_{b,w}$ 、 $f_{y,w}$  和  $h_w$  分别为钢梁腹板截面积、屈服强度和高度。值得一提的是,此处  $M_{yc,be}$  对应钢梁

表2 试验和有限元所得曲线特征值对比

Table 2 Comparisons of curve characteristic values obtained from tests and FEMs

节点	$S_{j,ini}/(\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{mrad}^{-1})$		误差/%	$M_y/(\text{kN}\cdot\text{m})$		误差/%	$M_p/(\text{kN}\cdot\text{m})$		误差/%
	试验	有限元		试验	有限元		试验	有限元	
T-V-N	3.456	4.215	22.0	69.15	66.12	-4.4	101.41	96.05	-5.3
T-H-N	3.434	3.728	8.6	63.42	62.29	-1.8	107.72	110.37	2.5
平均值			15.4			-3.1			-1.4

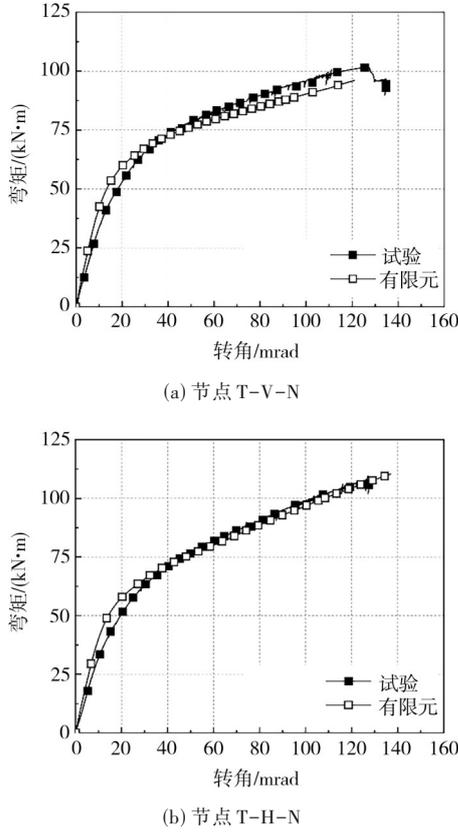


图6 T形方颈单边螺栓连接节点的转角-弯矩关系曲线对比  
Fig. 6 Comparisons of bending moment-rotation curves for T-head square-neck one-side bolted joints

全截面屈服弯矩。

### 3.1.2 峰值承载力

钢梁峰值承载力  $M_{pc,be}$  等于钢梁屈服承载力  $M_{yc,be}$  与其屈服后强度系数  $s$  的乘积。即：

$$M_{pc,be} = sM_{yc,be} \quad (3)$$

钢梁屈服后强度系数  $s$  的经验公式为：

$$\frac{1}{s} = C_1 + C_2 \lambda_{b,f}^2 + C_3 \lambda_{b,w}^2 + C_4 \frac{w_{b,f}}{L_v} + C_5 \frac{E}{E_h} + C_6 \frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_y} \quad (4)$$

$$\text{其中 } \lambda_{b,f} = \frac{w_{b,f}}{2t_{b,f}} \sqrt{\frac{f_{y,f}}{E}}$$

$$\lambda_{b,w} = \frac{h_w}{2t_{b,w}} \sqrt{\frac{f_{y,w}}{E}}$$

式中： $w_{b,f}$ 为钢梁翼缘宽度； $t_{b,f}$ 为钢梁翼缘厚度； $L_v$ 为钢梁塑性铰与零弯矩点之间的距离； $E$ 和 $E_h$ 分别为钢材弹性模量和应变硬化模量； $\varepsilon_y$ 和 $\varepsilon_h$ 分别为钢材屈服应变和硬化段初始应变； $\lambda_{b,f}$ 和 $\lambda_{b,w}$ 分别为钢梁翼缘和腹板的宽厚比； $t_{b,w}$ 为钢梁腹板厚度；无量纲系数  $C_1 \sim C_6$  分别取 1.710、0.167、0.006、-0.134、

-0.007和-0.053。

### 3.2 单边螺栓强度控制的节点抗弯承载力

文献[9]提出的T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点在螺栓和端板强度控制下的承载力计算模型如图7所示。

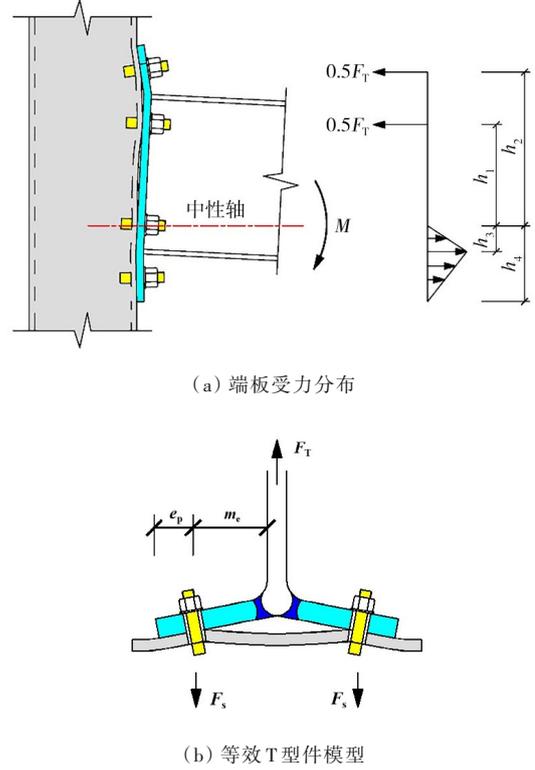


图7 T形方颈单边螺栓和端板强度控制下的钢梁-钢管柱节点承载力计算模型

Fig. 7 Calculation model for flexural capacity of beam-SHS column joints with strength control of T-head square-neck one-side bolts and endplates

单边螺栓强度控制下节点的峰值弯矩  $M_{pc,bo}$ ：

$$M_{pc,bo} = \frac{F_{T,bo}(3h_1 + 3h_2 + 2h_3 + 2h_4)}{6} \quad (5)$$

其中  $F_{T,bo} = n_t A_{be} f_{u,b}$

式中： $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 和 $h_4$ 为图7(a)中所标注的长度； $F_{T,bo}$ 为等效T型件在螺栓断裂破坏模式下的抗拉承载力； $n_t$ 、 $A_{be}$ 和 $f_{u,b}$ 分别为节点受拉区等效T型件模型中单边螺栓数目、单个单边螺栓的有效截面面积和单边螺栓的抗拉极限强度。

### 3.3 端板强度控制的节点抗弯承载力

端板强度控制下节点的屈服弯矩  $M_{yc,ep}$  同样由图7得出：

$$M_{yc,ep} = \frac{F_{T,ep}(3h_1 + 3h_2 + 2h_3 + 2h_4)}{6} \quad (6)$$

其中  $F_{T,ep} = \min [F_{T1}, F_{T2}]$

$$F_{T1} = \frac{(8n - 2e_w)M_{Tp}}{2m_e n - e_w(m_e + n)}$$

$$n = \min [e_p, 1.25m_e]$$

$$e_w = 0.25d_n$$

$$M_{Tp} = 0.25 l_{eff} t_e^2 f_{y,e}$$

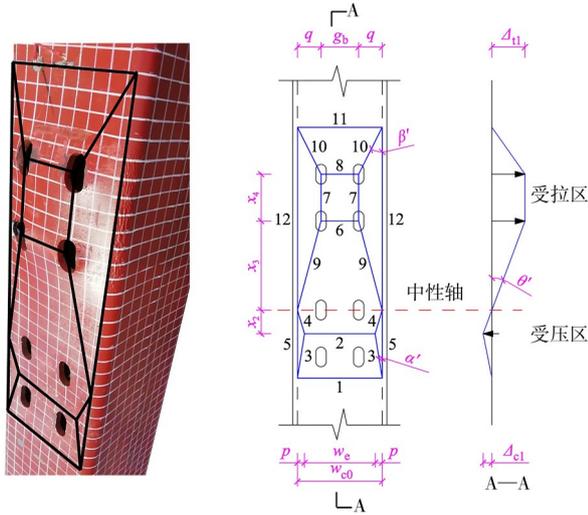
$$F_{T2} = \frac{2M_{Tp} + n \sum F_s}{m_e + n}$$

式中: $F_{T,ep}$ 为等效T型件在端板屈服破坏模式下的抗拉承载力; $M_{Tp}$ 为等效T型件翼缘所产生塑性铰线的弯矩; $m_e$ 为等效T型件单侧翼缘塑性铰线间的有效距离; $e_p$ 为图7所示长度或距离; $d_n$ 为螺母等效直径; $l_{eff}$ 为等效T型件翼缘塑性铰线有效长度; $t_e$ 和 $f_{y,e}$ 分别为端板厚度和端板屈服强度。

### 3.4 钢管柱强度控制的节点抗弯承载力

#### 3.4.1 屈服承载力

钢管柱强度控制下的节点抗弯承载力计算运用薄板屈服线理论,屈服线分布模式如图8所示。



注: $p$ 为端板边缘至柱壁内侧距离; $q$ 为螺栓孔中心至柱壁内侧距离; $\alpha'$ 为3号屈服线与5号的夹角; $\beta'$ 为10号屈服线与12号的夹角; $\theta'$ 为9号屈服线与12号的夹角; $\Delta_{11}$ 为柱壁外突变形量; $\Delta_{c1}$ 为柱壁内凹变形量。

图8 无肋端板连接下钢管柱壁屈服线分布模式

Fig. 8 Yield line pattern on the SHS column wall for joints without end-plate stiffeners

钢管柱强度控制下无肋端板连接的屈服弯矩  $M_{yc,co1}$ :

$$M_{yc,co1} = \left[ \left( \frac{2\eta \tan \alpha' + 8x_2}{w_{c0} - w_e} + \frac{4}{\tan \alpha'} + \frac{w_{c0} - w_e}{x_2} \right) x_2 + \left( \frac{2\kappa \tan \beta' + 8x_3 + 8x_4}{w_{c0} - g_b} + \frac{4}{\tan \beta'} + \frac{w_{c0}}{x_3} \right) x_3 \right] U_L \quad (7)$$

其中  $\eta = 2w_{c0} + w_e$

$$\kappa = 2w_{c0}$$

$$w_{c0} = w_e - 2t_e$$

$$\tan \alpha' = \sqrt{\frac{\eta^2 + 16(w_{c0} - w_e)^2}{2\eta}} - \frac{1}{2}$$

$$\tan \beta' = \sqrt{\frac{\kappa^2 + 16(w_{c0} - g_b)^2}{2\kappa}} - \frac{1}{2}$$

$$U_L = 0.25t_e^2 f_{y,e}$$

式中: $w_{c0}$ 为钢管柱计算宽度; $w_e$ 和 $w_c$ 分别为钢管柱外包宽度和端板宽度; $t_e$ 和 $f_{y,e}$ 分别为钢管柱壁厚和屈服强度; $g_b$ 为螺栓列距; $x_2, x_3$ 和 $x_4$ 为螺栓群几何参数。

#### 3.4.2 峰值承载力

钢管柱强度控制下节点的峰值承载力  $M_{pc,co}$  由柱壁长圆形螺栓孔的冲切破坏决定,因此有:

$$M_{pc,co} = \frac{F_{T,co}(3h_1 + 3h_2 + 2h_3 + 2h_4)}{6} \quad (8)$$

其中  $F_{T,co} = \frac{\sqrt{3}}{3} n_t A_{ev,bh} f_{u,c}$

$$A_{ev,bh} = \chi A_{v,bh}$$

$$A_{v,bh} = (\pi d_b - 2\delta_b) t_c$$

式中: $F_{T,co}$ 为等效T型件在栓孔冲切破坏模式下的抗拉承载力; $A_{v,bh}$ 和 $A_{ev,bh}$ 分别为长圆形螺栓孔在T形螺栓头作用下的理论冲切面积和有效冲切面积; $f_{u,c}$ 为钢管柱极限强度; $\chi$ 为螺栓孔有效冲切面积折减系数,栓孔V形布置和H形布置模型下分别取值0.65和0.60; $d_b$ 和 $\delta_b$ 分别为螺栓直径和螺栓安装间隙。

### 4 扩大化参数分析

为了进一步验证文献[6,9]所提出的T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点抗弯承载力计算方法,本文对17个具有不同钢管柱尺寸、钢梁尺寸、端板尺寸、螺栓群尺寸和H钢组件尺寸的节点进行了抗弯承载力理论计算和有限元数值模拟。17个节点以文献[9]中试件T-H-N为基本模型,各节点的详细几何参数均列于表3中,理论计算结果和有限元结果的对比则汇总于表4中。表中,破坏模式符号CO、EP、BE、BH分别表示柱壁屈服、端板屈服、钢梁屈服和柱壁螺栓孔冲切破坏;三星蓝色标志、两星黄色标志以及一星红色标志分别表示理论公式预测的节点破坏模式与有限元结果完全一致、部分一致和完全不同。表4中下划线数据表示预测最小

值,作为计算取值。

表3 有限元模型参数

**Table 3 Parameters of finite element models mm**

序号	钢管柱		钢梁				端板	螺栓群	
	$w_c$	$t_c$	$t_{b,f}$	$t_{b,w}$	$w_{b,f}$	$h_w$	$t_e$	$d_b$	$g_b$
1	220	10	9	6.5	150	282	18	20	80
2	240	10	9	6.5	150	282	18	20	80
3	200	8	9	6.5	150	282	18	20	80
4	200	12	9	6.5	150	282	18	20	80
5	200	12	8	6.0	150	282	20	20	80
6	200	10	9	6.5	150	282	20	20	80
7	200	10	9	6.5	150	282	10	20	80
8	200	12	9	6.5	150	282	20	16	80
9	220	12	9	6.5	150	282	22	20	80
10	240	12	9	6.5	150	282	22	20	80
11	200	8	9	6.5	150	282	14	20	80
12	200	12	9	6.5	150	282	14	20	80
13	240	12	9	6.5	150	282	22	16	80
14	240	12	9	6.5	150	302	20	20	80
15	240	12	9	6.5	180	302	20	20	80
16	240	12	9	6.5	180	302	20	20	90
17	240	12	9	6.5	180	302	20	20	100

从表4中可以看出,节点抗弯承载力理论计算值与有限元值之间的误差基本保持在15%之内,仅节点7的预测误差较大,但是不超过40%。此外,表

内数据还表明理论公式对节点峰值承载力的预测结果优于屈服承载力。从破坏模式来看,表4中有47.1%的节点被完全准确预测,47.1%的节点被部分成功预测,仅有5.8%的节点预测错误。考虑到节点构造复杂、各组件分析模型简化等方面的影响,笔者认为这种程度的承载力预测误差和破坏模式预测误差是可以接受的。总之,文献[6,9]提出的T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点的承载力分析模型及计算公式可以准确预测此类节点的抗弯承载力及破坏模式。

## 5 结论

通过有限元数值模拟的方法对文献[6,9]所提出的T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点抗弯承载力分析模型和计算公式进行了扩大化参数分析,以填补试验研究未考虑参数的空缺,验证理论分析模型的可靠性和准确性。得出的主要结论如下:

1)所建立的T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点三维有限元模型不仅能够准确预测节点在单调荷载下的破坏模式、各部件受力状态和屈服顺序,还能得到与试验结果吻合度较高的节点转角-弯矩关系曲线,具有较高的准确度和可靠性,为该类节点的工作机理分析、参数化研究和结构性能评

表4 理论计算结果与有限元计算结果对比

Table 4 Comparisons of theoretical results and finite element results

序号	弯矩/(kN·m)								理论	弯矩/(kN·m)		有限元	$\frac{M_{y,theory}}{M_{y,FE}}$	$\frac{M_{p,theory}}{M_{p,FE}}$	破坏模式
	$M_{yc,be}$	$M_{yc,ep}$	$M_{yc,co}$	$M_{pc,be}$	$M_{pc,bo}$	$M_{pc,co}$	$M_{y,theory}$	$M_{p,theory}$	破坏模式	$M_{y,FE}$	$M_{p,FE}$	破坏模式	$M_{y,FE}$	$M_{p,FE}$	
1	129.97	101.50	<u>60.82</u>	152.39	317.55	<u>111.56</u>	<b>60.82</b>	<b>111.56</b>	CO+EP	66.76	109.51	CO+EP	0.911	1.019	★★★
2	129.97	101.50	<u>53.53</u>	152.39	317.55	<u>111.56</u>	<b>53.53</b>	<b>111.56</b>	CO+EP	63.71	109.45	CO+EP	0.840	1.019	★★★
3	129.97	101.50	<u>45.06</u>	152.39	317.55	<u>89.26</u>	<b>45.06</b>	<b>89.26</b>	CO	51.20	99.47	CO+EP	0.880	0.897	★★
4	129.97	<u>101.50</u>	112.40	152.39	317.55	<u>133.87</u>	<b>101.50</b>	<b>133.87</b>	CO+EP+BE	88.82	143.44	CO+EP+BE	1.143	0.933	★★★
5	116.40	125.30	<u>112.40</u>	<u>131.56</u>	317.55	133.87	<b>112.40</b>	<b>131.56</b>	CO+EP+BE	92.42	139.63	CO+EP+BE	1.216	0.942	★★★
6	129.97	125.30	<u>73.86</u>	152.39	317.55	<u>111.56</u>	<b>73.86</b>	<b>111.56</b>	CO	76.41	127.37	CO+EP	0.967	0.876	★★
7	129.97	<u>31.33</u>	73.86	152.39	317.55	<u>111.56</u>	<b>31.33</b>	<b>111.56</b>	CO+EP	51.60	87.45	CO+EP	0.607	1.276	★★★
8	129.97	125.30	<u>112.40</u>	152.39	203.23	<u>105.27</u>	<b>112.40</b>	<b>105.27</b>	BH	89.49	142.68	CO+EP+BE	1.256	0.738	★
9	129.97	151.62	<u>90.40</u>	152.39	317.55	<u>133.87</u>	<b>90.40</b>	<b>133.87</b>	CO+BE	88.19	140.68	CO+EP+BE	1.025	0.952	★★
10	129.97	151.62	<u>78.82</u>	152.39	317.55	<u>133.87</u>	<b>78.82</b>	<b>133.87</b>	CO+BE	84.25	120.17	CO+EP+BE	0.936	1.114	★★
11	129.97	61.40	<u>45.06</u>	152.39	317.55	<u>89.26</u>	<b>45.06</b>	<b>89.26</b>	CO+EP	48.07	89.79	CO+EP	0.937	0.994	★★★
12	129.97	<u>61.40</u>	112.40	152.39	317.55	<u>133.87</u>	<b>61.40</b>	<b>133.87</b>	CO+EP+BE	79.59	129.85	CO+EP+BE	0.771	1.031	★★★
13	129.97	151.62	<u>78.82</u>	152.39	203.23	<u>105.27</u>	<b>78.82</b>	<b>105.27</b>	CO	83.60	124.38	CO+EP	0.943	0.846	★★
14	141.58	133.56	<u>87.91</u>	160.69	338.49	<u>142.70</u>	<b>87.91</b>	<b>142.70</b>	CO+EP+BE	87.34	145.01	CO+EP+BE	1.007	0.984	★★★
15	161.97	160.28	<u>99.61</u>	183.18	338.49	<u>142.70</u>	<b>99.61</b>	<b>142.70</b>	CO	91.32	145.15	CO+EP	1.091	0.983	★★
16	161.97	160.28	<u>104.27</u>	183.18	338.49	<u>142.70</u>	<b>104.27</b>	<b>142.70</b>	CO	93.09	159.96	CO+EP	1.120	0.892	★★
17	161.97	160.28	<u>109.73</u>	183.18	338.49	<u>142.70</u>	<b>109.73</b>	<b>142.70</b>	CO	96.13	147.24	CO+EP	1.141	0.969	★★

估提供了可靠途径。

2)节点抗弯承载力理论计算值与有限元值之间的误差基本保持在15%之内,仅有个别节点的误差较大,但是不超过40%。此外,理论公式对节点峰值承载力的预测结果优于屈服承载力。

3)从破坏模式来看,47.1%的节点被完全准确预测,47.1%的节点被部分成功预测,仅有5.8%的节点预测错误。考虑到节点构造复杂、各组件分析模型简化等方面的影响,笔者认为这种程度的承载力预测误差和破坏模式预测误差是可以接受的。

#### 参考文献

- [1] 孙乐乐. T形方颈单边螺栓连接钢梁-方钢管柱节点力学性能与设计方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [2] 王静峰, 龚旭东, 姜涛, 等. 钢管混凝土边柱与组合梁端板连接的抗震试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(11): 44-53.
- [3] 徐婷, 王伟, 陈以一. 国外单边螺栓研究现状[J]. 钢结构, 2015, 30(8): 27-33.
- [4] 陈珂璠, 李宇哈, 陆金钰. 单边紧固螺栓在结构工程中的应用的研究进展[J]. 江苏建筑, 2016, 23(1): 27-30.
- [5] 梁晓婕, 王燕. 钢结构装配式半刚性连接节点研究进展[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(1): 1-14.
- [6] Sun L, Liang Z, Wang Q, et al. Seismic response on T-head square-neck one-side bolted endplate connection of beam to square tubular column[J]. Engineering Structures, 2021, 246, 113077.
- [7] Wang P, Sun L, Zhang B, et al. Experimental studies on T-stub to hollow section column connection bolted by T-head square-neck one-side bolts under tension[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 178, 106493.
- [8] Wang P, Sun L, Xia C, et al. Cyclic behavior of T-stub connection to hollow section steel column using TSOBs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 185, 106874.
- [9] Sun L, Liang Z, Wu L, et al. Experimental and theoretical modeling for predicting bending moment capacity of T-head square-neck one-side bolted endplate to tube column connection[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 43, 103104.
- [10] Sun L, Liang Z, Cai M, et al. Experimental investigation on monotonic bending behaviour of TSOBs bolted beam to hollow square section column connection with inner stiffener[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 46, 103765.
- [11] Sun L, Liang Z, Cai M, et al. Seismic behaviour of TSOBs bolted I-beam to hollow section square column connection with inner stiffener[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 51, 104260.
- [12] ABAQUS Inc. ABAQUS/CAE user's guide, version 2016 [EB/OL]. [2022-08-30]. <http://130.149.89.49:2080/v2016/index.html>.
- [13] 王一煥. 锚固单向螺栓力学性能及其在抗弯框架中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [14] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures-part 1-1: general rules and rules for buildings: BS EN 1993-1-1 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [15] 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.
- [16] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures-part 1-8: design of joints: BS EN 1993-1-8 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.

## Parametric Analysis on the Enhancement of Bending Capacity in T-stub Square-Neck Single-Side Bolted Connections

Quanwei Liu<sup>1</sup> Lele Sun<sup>2,3</sup> Shoujie Ye<sup>1</sup> Peijun Wang<sup>3</sup> Gangling Hou<sup>2</sup>

(1. Qingdao Metro Group Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

2. Yantai Research Institute, Harbin Engineering University, Yantai 264003, China;

3. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

#### Abstract:

Based on the analysis models and calculation equations of bending bearing capacity of beam-column joints with T-head Square-neck One-side Bolts (TSOBs), the expanded parameter analysis was carried out through the Finite Element (FE) numerical simulation method to fill the gap of parameters not considered in the experimental studies and verify the reliability and accuracy of the theoretical analysis models. The results showed that: 1) the three-dimensional FE model of the joints established in the paper could not only accurately predict the failure modes, stress state of each component and yield sequence of the joints under monotone loading, but also obtain the bending moment-rotation relation curves with high consistency with the test results; 2) the error between the theoretical calculation values and the FE values of the bending bearing capacity for the joints was basically within 15%, and only the error of some joints was larger, but not more than 40%. In addition, the peak bearing capacity predicted by the theoretical equation was better than

the yield one; 3) for the failure modes, 47.1% of the joints were completely predicted accurately, 47.1% were partially predicted successfully, and only 5.8% of the joints were predicted incorrectly. Considering the complex structure of the joints and the simplification of the analysis models of each component, this degree of prediction error for bending bearing capacity and failure mode should be acceptable.

**Keywords:** T-head square-neck one-side bolt; square hollow steel column; beam-column joint; flexural capacity; finite element analysis