

# T形方颈单边螺栓连接梁柱节点抗弯承载力研究

王新华<sup>1</sup>, 孙乐乐<sup>2\*</sup>, 王培军<sup>3</sup>

(1. 山西工程科技职业大学 工程管理学院, 山西 晋中 030619; 2. 哈尔滨工程大学 烟台研究院, 山东 烟台 264000; 3. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061)

**摘要:** 研发T形方颈单边螺栓的初衷是为解决闭口截面钢构件的螺栓连接难题, 尤其是钢梁-钢管柱连接。目前已有较多针对T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点的研究, 但是相关研究并未建立系统全面的节点承载力计算模型, 这在一定程度上限制了此类连接的推广和使用。本文在国内外相关研究成果的基础上基于组件分析法和薄板塑性铰线理论提出了T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点的抗弯承载力计算方法, 可用于此类连接的结构性能预测。本文主要结论为: 基于薄板屈服线理论, 提出无肋端板连接下钢管柱连接面的屈服线分布模式并推导得到钢管柱壁强度控制下节点的抗弯承载力; 提出栓孔竖向分布和水平分布下的有效冲切面积折减系数, 分别取值0.65和0.60; 本文所提T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点的抗弯承载力计算方法准确可靠, 其所得节点抗弯承载力与试验值之间的误差保持在15%之内。

**关键词:** T形方颈单边螺栓; 组件分析法; 薄板塑性铰线理论; 梁柱节点; 抗弯承载力; 有效冲切面积折减系数

中图分类号: TU398<sup>+</sup>.9

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)08-0065-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240317001

## Study on Bending Bearing Capacity of Beam-Column Joints Using T-Head Square-Neck One-Side Bolts

WANG Xinhua<sup>1</sup>, SUN Lele<sup>2\*</sup>, WANG Peijun<sup>3</sup>

(1. College of Engineering Management, Shanxi Vocational University of Engineering Science and Technology, Jinzhong 030619, China; 2. Yantai Research Institute, Harbin Engineering University, Yantai 264000, China; 3. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

\*Corresponding author: lelesun117@hrbeu.edu.cn

**Abstract:** The original intention of developing T-head Square-neck One-side Bolts (TSOBs) is to solve the problem of bolting the closed section members, especially the I-beam to Square Hollow Section (SHS) column joints. At present, there are some studies on TSOBs connected I-beam to SHS column joints, but the related research has not established a systematic and comprehensive calculation model of joint bearing capacity, which limits the promotion of such joints. On the basis of relevant domestic and international research results, a method for calculating the bending bearing capacity of I-beam to SHS column joints with TSOBs is proposed by using component analysis method and plastic hinge line theory of thin plate. The main results of this paper show that based on yield line theory of thin plate, the distribution model of yield lines for SHS column wall is proposed and the bending bearing capacity of the joints

收稿日期: 2024-03-17

基金项目: 国家自然科学基金(52408166), 山东省住房城乡建设科技计划(2024KYKF-JZGYH101), 中央高校基本业务费项目(3072024JJ2701)

作者简介:

王新华(1982—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事装配式结构体系方面的研究。E-mail: 86854677@qq.com。

通信作者:

孙乐乐(1995—), 男, 博士, 副教授, 主要从事装配式钢结构和组合结构抗震性能方面的研究。E-mail: lelesun117@hrbeu.edu.cn。

governed by SHS wall strength is derived. The effective punching area reduction coefficients under the vertical and horizontal distributions of bolt holes are proposed, with values of 0.65 and 0.60. The calculation method for the bending bearing capacity of the joints with TSOBs is accurate and reliable, and the difference between the calculated results and the test values is within 15%.

**Keywords:** T-head square-neck one-side bolt; component analysis method; plastic hinge line theory of thin plate; beam-column joint; bending bearing capacity; the effective punching area reduction coefficient

单边螺栓是一类可以单侧安装拧紧的连接件,可用于闭口截面钢管柱与钢梁的连接<sup>[1]</sup>。目前,国内外学者已经提出十数种单边螺栓并对其进行了大量的理论分析和试验研究工作。徐婷等<sup>[2]</sup>回溯了国外单边螺栓20年的发展历史,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>[3]</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>[4]</sup>发表综述文章认为虽然目前市面上已有多多种单边螺栓,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来指导工程实践。

T形方颈单边螺栓是本文的研究学者们提出的一类新型单侧安装紧固件,其构造简单、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>[5]</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>[6-7]</sup>通过对T形件-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形件-钢管节点的设计方法,并叙述了此类单边螺栓的应用潜力。基于WANG等<sup>[6-7]</sup>的研究,SUN等<sup>[5,8]</sup>首次将T形方颈单边螺栓用于足尺梁柱节点的连接,并通过模型试验对此类梁柱节点开展了抗弯性能和抗震性能研究。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>[9-10]</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型钢组件加强方案,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型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,实际工程中推荐使用外伸H型钢组件。

WANG等<sup>[6-7]</sup>和SUN等<sup>[5,8-10]</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造试件(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。

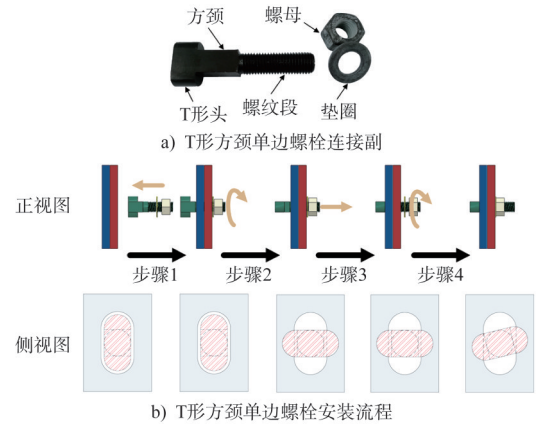


图1 T形方颈单边螺栓构造及用法

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

张伯勋<sup>[11]</sup>和CAI等<sup>[12]</sup>针对螺纹锚固单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点的抗弯承载力计算模型进行了研究。李国强等<sup>[13]</sup>、赵均海等<sup>[14]</sup>和WANG等<sup>[15]</sup>则分别提出了套管锚固式单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点的转角-弯矩关系分析模型。此外,左凌霄<sup>[16]</sup>针对新型椭圆头单边螺栓提出了钢梁-钢管柱节点的屈服弯矩计算公式。虽然本文所研究T形方颈单边螺栓构造及锚固原理与椭圆头单边螺栓相似,但是左凌霄<sup>[16]</sup>仅考虑了单一破坏模式下的节点承载力计算,并未系统地建立完整的承载力分析模型。

因此,本文在国内外相关研究成果的基础上应用组件分析法和薄板塑性铰线理论提出了T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点的抗弯承载力计算方法,可用于此类连接的结构性能预测。

## 1 节点详情

本文以文献[8]中的T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点试件为研究对象提出此类连接的结构分析模型,图2所示为文献[8]中的试件详图。其中,钢管柱采用冷拔方钢管,截面为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ;钢梁采用热轧H型钢,截面为 $300\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 6.5\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ ;T形方颈单边螺栓均为M20规格,采用铣床经由Cr40合金钢棒制成。除此之外,试件各部件材料性能参数汇总于表1中。本文针对节点承载力计算所需几何数

据和力学性能数据均参照图2和表1。

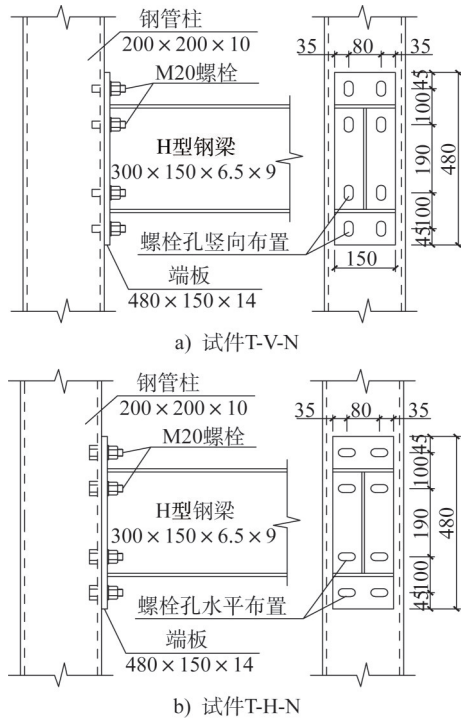


图2 文献[8]中试件构造和尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Details and dimensions of specimens in reference [8] (unit:mm)

表1 文献[8]中试件材性汇总

Table 1 Summary of material properties in reference [8]

型 材	取样 部位	实测厚度或 直径/mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	弹性模量/ MPa
板	钢管壁	10.08	314.20	392.75	$1.95 \times 10^5$
材	梁翼缘	8.96	242.81	421.80	$2.02 \times 10^5$
	梁腹板	6.46	267.44	398.83	$1.93 \times 10^5$
	外伸端板	14.10	275.39	350.97	$1.92 \times 10^5$
棒	T形方颈 单边螺栓	20.02	740.09	833.49	$1.98 \times 10^5$

## 2 抗弯承载力计算

由文献[5]和文献[8]的试验结果可知,T形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点的抗弯承载力与其破坏模式有关,取决于最早破坏的组件。因此,节点抗弯承载力取钢梁、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:

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

$$M_{pc} = \min(M_{pc,be}, M_{pc,bo}, M_{pc,co}) \quad (2)$$

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。

由于高强螺栓的断裂属于脆性破坏,其屈服承载力与峰值承载力相近,因此式(1)和(2)中仅考虑单边螺栓的峰值承载力。而端板屈服后延性较大,承载力持续增长,峰值承载力所对应的节点变形状态不明确,故式(1)和(2)中仅考虑端板的屈服承载力。

在本文中,节点抗弯承载力的计算模型仅考虑节点所受弯矩荷载,不考虑梁柱中剪力和轴力对节点承载力的影响。本文计算节点抗弯承载力的基本流程为:(1)分别计算钢梁、单边螺栓、端板和钢管柱壁强度控制下节点的屈服弯矩和峰值弯矩;(2)分别取各组件强度控制下节点屈服弯矩最小值和峰值弯矩最小值作为节点的屈服承载力和峰值承载力。

### 2.1 钢梁强度控制的节点抗弯承载力

#### 2.1.1 屈服承载力

钢梁强度控制下的节点抗弯承载力 $M_{yc,be}$ 与钢梁构件抗弯承载力相同。考虑钢梁翼缘腹板材性可能不一致,本文采用欧洲规范<sup>[17]</sup>中H形或I形截面热轧钢梁的塑性抗弯承载力公式,如下:

$$M_{yc,be} = A_{b,f} f_{y,f} (h_w + t_{b,f}) + 0.25 A_{b,w} f_{y,w} h_w \quad (3)$$

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 $M_{yc,be}$ 对应钢梁全截面屈服弯矩。

#### 2.1.2 峰值承载力

对于H形或I形截面钢梁而言,其峰值承载力出现在构件屈服之后,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。

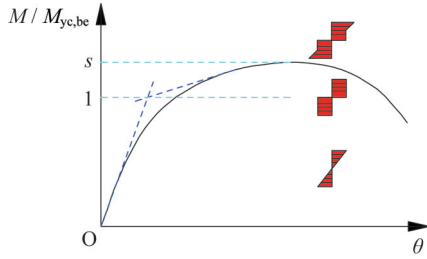
$$M_{pc,be} = s M_{yc,be} \quad (4)$$

图3为钢梁屈服后强度系数 $s$ 示意图。当钢梁处于弹性阶段时,截面应变和应力符合平截面分布;随着钢梁弯矩达到 $M_{yc,be}$ ,构件全截面屈服进入塑性状态;当钢梁弯矩超过 $M_{yc,be}$ 后,其翼缘应力进一步增大直至翼缘或腹板屈曲方达到其峰值弯矩 $M_{pc,be}$ 。因此,钢梁屈服后强度系数 $s$ 受众多因素影响,尤其是钢梁的截面尺寸和钢材的力学性能。

根据现有钢梁的极限承载力试验结果,D'ANIELLO等<sup>[18]</sup>经过大量的数据拟合总结了具有较高准确度的H形或I形截面钢梁屈服后强度系数 $s$ 的经验公式:

$$\frac{1}{s} = C_1 + C_2 \lambda_{b,f}^2 + C_3 \lambda_{b,w}^2 + C_4 \frac{\omega_{b,f}}{L_v} + C_5 \frac{E}{E_h} + C_6 \frac{\epsilon_h}{\epsilon_y} \quad (5)$$

式中: $\omega_{b,f}$ 为钢梁翼缘宽度; $L_v$ 为钢梁塑性铰与零弯矩点

图3 钢梁屈服后强度系数  $s$  示意Fig. 3 Schematic diagram of post-yield strength coefficient  $s$  for I-beam

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;  $\epsilon_y$  和  $\epsilon_h$  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系数, 可由下式求得:

$$\lambda_{b,f} = \frac{w_{b,f}}{2t_{b,f}} \sqrt{\frac{f_{y,f}}{E}} \quad (6)$$

$$\lambda_{b,w} = \frac{h_w}{2t_{b,w}} \sqrt{\frac{f_{y,w}}{E}} \quad (7)$$

式中:  $t_{b,w}$  为钢梁腹板厚度。

除此之外, D'ANIELLO 等<sup>[18]</sup> 建议式(5)中的无量纲系数  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$  和  $C_6$  分别取值 1.710、0.167、0.006、-0.134、-0.007 和 -0.053。

## 2.2 单边螺栓强度控制的节点抗弯承载力

通过分析文献[5]和文献[8]的钢梁截面应变分布以及钢管柱变形发展可以发现无肋端板连接节点的旋转中心靠近钢梁受压翼缘内侧。因此, 本文针对无肋端板连接取靠近钢梁受压翼缘的内排螺栓为节点的旋转中心。考虑到本文所研究节点均为半刚性节点, 故采用翼缘内外螺栓拉力相同模型<sup>[1]</sup>。此外, 现有的规范针对 H 型钢梁柱端板连接基本不考虑受压区对节点抗弯承载力的贡献, 这是因为 H 型钢柱所受压力由腹板承担, 因此受压变形较小, 压力分布范围小且靠近旋转中心。相比 H 型钢柱, 中空钢管柱所受压力荷载则主要由连接面承担。在平面外压荷载下, 钢管柱连接面产生较大内凹变形, 导致压力分布范围变大, 受压中心远离旋转中心。因此, 本文认为针对钢梁-钢管柱节点的螺栓排受力分布模式应考虑受压区贡献。基于以上节点旋转中心和螺栓排受力分布模式的分析, 并结合组件法中的等效 T 形件模型, 本文提出 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 4 所示。

由图 4a) 可以得出单边螺栓强度控制下节点的峰值弯矩  $M_{pc,bo}$ :

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

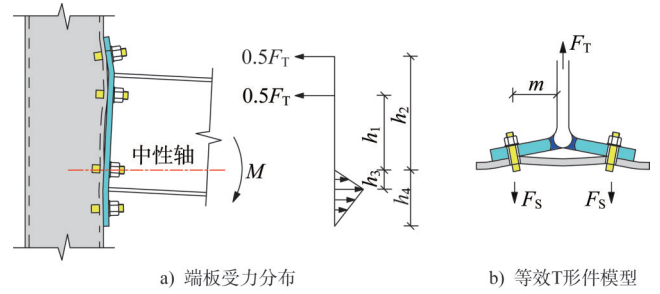


图4 T形方颈单边螺栓和端板强度控制下节点承载力计算模型

Fig. 4 Calculation model for joint bearing capacity with strength control of T-head square-neck one-side bolt and endplate

式中:  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$  和  $h_4$  为图 4a) 中所标注长度;  $F_{T,bo}$  为等效 T 形件在螺栓断裂破坏模式下的抗拉承载力, 根据下式求得:

$$F_{T,bo} = n_1 A_{be} f_{u,b} \quad (9)$$

式中:  $n_1$ 、 $A_{be}$  和  $f_{u,b}$  分别为节点受拉区等效 T 形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。

## 2.3 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 4 得出:

$$M_{yc,ep} = \frac{F_{T,ep}(3h_1 + 3h_2 + 2h_3 + 2h_4)}{6} \quad (10)$$

式中:  $F_{T,ep}$  为等效 T 形件在端板屈服破坏模式下的抗拉承载力。根据欧洲规范<sup>[17]</sup>, 梁柱端板连接的等效 T 形件模型有 3 种破坏模式, 分别为完全翼缘屈服、翼缘屈服伴随栓杆拉断和栓杆拉断, 如图 5 所示。

图 5 中破坏模式 3 为单边螺栓强度控制, 破坏模式 1 和 2 属于端板强度控制。因此, 本文中  $F_{T,ep}$  取等效 T 形件模型破坏模式 1 和 2 中的较小值, 即:

$$F_{T,ep} = \min(F_{T1}, F_{T2}) \quad (11)$$

式中:  $F_{T1}$  和  $F_{T2}$  分别是等效 T 形件模型在破坏模式 1 和 2 下的抗拉承载力, 可以通过下式得到:

$$F_{T1} = \frac{(8n - 2e_w)M_{Tp}}{2m_e n - e_w(m_e + n)} \quad (12)$$

$$n = \min(e_p, 1.25m_e) \quad (13)$$

$$e_w = 0.25d_n \quad (14)$$

$$M_{Tp} = 0.25l_{eff}^2 f_{y,e} \quad (15)$$

$$F_{T2} = \frac{2M_{Tp} + n(\sum F_s)}{m_e + n} \quad (16)$$

式中:  $M_{Tp}$  为等效 T 形件翼缘所产生塑性铰线的弯矩;  $m_e$  为等效 T 形件单侧翼缘塑性铰线间有效距离;  $e_p$  为图 5 所示长度或距离;  $d_n$  为螺母等效直径;  $l_{eff}$  为等效 T 形件翼

缘塑性铰线有效长度; $t_c$ 和 $f_{y,c}$ 分别为端板厚度和端板屈服强度。

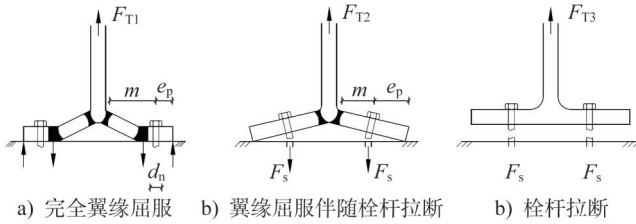


图5 等效T形件模型的3种破坏模式

Fig. 5 Three failure modes of equivalent T-stub connection

## 2.4 钢管柱强度控制的节点抗弯承载力

### 2.4.1 屈服承载力

钢管柱强度控制下的节点抗弯承载力计算主要运用了薄板屈服线理论,其基本原理是通过试验和理论分析假定一种与荷载和边界条件相协调的破坏机构,再运用虚功原理和平衡方程确定板件平面外受弯的极限荷载<sup>[19]</sup>。因此钢管柱连接面屈服线分布模式决定了其抗弯承载力。

事实上,许多学者已经将屈服线理论用于钢管柱壁承载力的计算中,并提出了相应的屈服线分布模式。GOMES等<sup>[20]</sup>和YEOMANS<sup>[21-22]</sup>分别针对受拉状态下的钢管柱腹板和翼缘提出了非直线型和直线型屈服线分布模式。WANG等<sup>[6-7]</sup>则在GOMES等<sup>[20]</sup>和YEOMANS<sup>[21-22]</sup>的研究基础上考虑了长圆形螺栓孔对柱壁受拉状态下屈服线模式的影响并对公式进行了修正。除钢管柱受拉状态下的屈服线分布模式外,李国强等<sup>[13]</sup>和WANG等<sup>[23]</sup>还针对套管变形锚固式单边螺栓和螺纹栓孔锚固式单边螺栓连接钢管柱分别提出其在梁端弯矩荷载作用下的屈服线分布模式。在梁柱节点中,应用屈服线理论求解钢管柱强度控制下节点抗弯承载力 $M_{yc,co}$ 的数学表达式为:

$$M_{yc,co}\theta = \sum l_i \varphi_i U_L \quad (17)$$

式中: $\theta$ 为梁柱节点的转角; $l_i$ 和 $\varphi_i$ 分别为钢管柱连接面第*i*条塑性铰线的有效长度及其转角; $U_L$ 为单位长度塑性铰线转动单位角度所消耗的能量,可通过下式计算:

$$U_L = 0.25 t_c^2 f_{y,c} \quad (18)$$

式中: $t_c$ 和 $f_{y,c}$ 分别为钢管柱壁厚度和屈服强度。

虽然李国强等<sup>[13]</sup>和WANG等<sup>[23]</sup>提出了钢管柱在梁端弯矩荷载作用下的柱壁屈服线模式,但是并未涉及到开设长圆形螺栓孔的柱壁的节点。

结合文献[5]和文献[8]的试验现象和理论分析,无肋端板连接下钢管柱连接面的屈服线分布模式如图6所示。根据屈服线的长度和转动的角度,可以将屈服线模

式划分为12类直线型屈服线,如图6所示。图中 $w_{c0}$ 为钢管柱计算宽度,等于 $w_c - 2t_c$ ;  $w_c$ 为端板宽度;  $g_b$ 为螺栓列距;  $p$ 和 $q$ 分别为端板边缘和边列螺栓至钢管柱侧壁内表面的距离;  $\alpha'$ 为3号和5号屈服线的夹角;  $\beta'$ 为10号和12号屈服线的夹角;  $\Delta_{t1}$ 和 $\Delta_{c1}$ 分别为无肋端板连接下钢管柱受拉区和受压区的外凸变形值和内凹变形值。

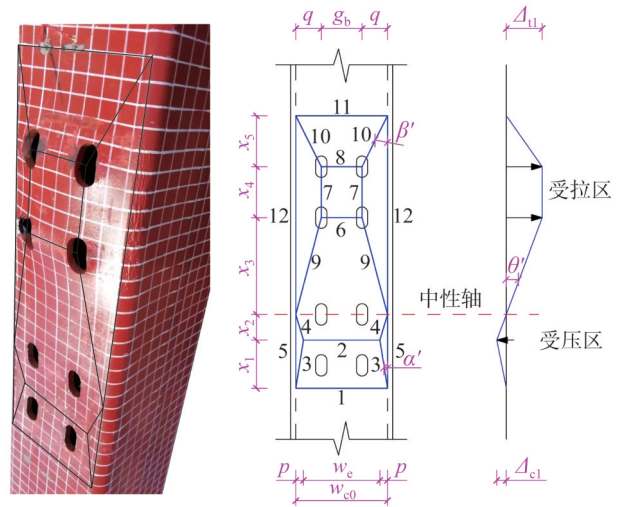


图6 无肋端板连接下钢管柱壁屈服线分布模式

Fig. 6 Yield line pattern on tubular column wall for joint without endplate stiffeners

根据图6所示几何关系,无肋端板连接下钢管柱壁12类直线型屈服线各自耗散能量值为:

$$U'_1 = \frac{\Delta_{c1} w_{c0}}{x_1} U_L \quad (19)$$

$$U'_2 = \frac{2\Delta_{c1} w_c}{x_1} U_L \quad (20)$$

$$U'_3 = \left( \frac{2\Delta_{c1} p}{x_1} + \frac{2\Delta_{c1} x_1}{p} \right) U_L \quad (21)$$

$$U'_4 = \left( \frac{2\Delta_{c1} p}{x_2} + \frac{2\Delta_{c1} x_2}{p} \right) U_L \quad (22)$$

$$U'_5 = \frac{2\Delta_{c1} (x_1 + x_2)}{p} U_L \quad (23)$$

$$U'_6 = \frac{\Delta_{t1} g_b}{x_3} U_L \quad (24)$$

$$U'_7 = \frac{2\Delta_{t1} x_4}{q} U_L \quad (25)$$

$$U'_8 = \frac{\Delta_{t1} g_b}{x_5} U_L \quad (26)$$

$$U'_9 = \left( \frac{2\Delta_{t1} q}{x_3} + \frac{2\Delta_{t1} x_3}{q} \right) U_L \quad (27)$$

$$U'_{10} = \left( \frac{2\Delta_{t1} q}{x_5} + \frac{2\Delta_{t1} x_5}{q} \right) U_L \quad (28)$$

$$U'_{11} = \frac{\Delta_{t1} w_{c0}}{x_5} U_L \quad (29)$$

$$U'_{12} = \frac{2\Delta_{t1}(x_3 + x_4 + x_5)}{q} U_L \quad (30)$$

式(19)~(30)中,  $x_1 \sim x_5$  为钢管柱壁屈服线分布在柱高方向上的尺寸, 其中  $x_2, x_3$  和  $x_4$  为螺栓群几何参数, 可由图6直接获取, 而  $x_1$  和  $x_5$  则根据几何关系计算得到:

$$x_1 = \frac{p}{\tan\alpha'} \quad (31)$$

$$x_5 = \frac{q}{\tan\beta'} \quad (32)$$

因此, 无肋端板连接下钢管柱壁所有屈服线所耗散的能量为:

$$U'_{tal} = \sum_{i=1}^{12} U'_i = \left[ \left( \frac{\eta \tan\alpha' + 4x_2}{p} + \frac{4}{\tan\alpha'} + \frac{2p}{x_2} \right) \Delta_{c1} + \left( \frac{\kappa \tan\beta' + 4x_3 + 4x_4}{q} + \frac{4}{\tan\beta'} + \frac{\kappa - w_{c0}}{x_3} \right) \Delta_{t1} \right] U_L \quad (33)$$

其中,

$$\eta = 2w_{c0} + w_e \quad (34)$$

$$\kappa = 2w_{c0} \quad (35)$$

$$w_{c0} = w_c - 2t_c \quad (36)$$

采用势能驻值定理<sup>[23]</sup>, 取  $U'_{tal}$  的极值, 则有:

$$\frac{\partial U'_{tal}}{\partial \alpha'} = 0 \Rightarrow \tan^2 \alpha'_0 = \frac{\sqrt{\eta^2 + 64p^2}}{2\eta} - \frac{1}{2} \quad (37)$$

$$\frac{\partial U'_{tal}}{\partial \beta'} = 0 \Rightarrow \tan^2 \beta'_0 = \frac{\sqrt{\kappa^2 + 64q^2}}{2\kappa} - \frac{1}{2} \quad (38)$$

进而得到:

$$\tan \alpha'_0 = \sqrt{\frac{\sqrt{\eta^2 + 16(w_{c0} - w_e)^2}}{2\eta} - \frac{1}{2}} \quad (39)$$

$$\tan \beta'_0 = \sqrt{\frac{\sqrt{\kappa^2 + 16(w_{c0} - g_b)^2}}{2\kappa} - \frac{1}{2}} \quad (40)$$

此外, 由于假定2号、4号、6号和9号屈服线所围成的区域为刚性区域, 因此会有等式:

$$\tan \theta' = \theta' = \frac{\Delta_{c1}}{x_2} = \frac{\Delta_{t1}}{x_3} \quad (41)$$

式中:  $\theta'$  为无肋端板连接下节点发生的转角。

将公式(33)~(36)、(39)~(41)带入公式(17)中得到钢管柱强度控制下无肋端板连接的屈服弯矩  $M_{yc,co}$ :

$$M_{yc,co} = \left[ \left( \frac{2\eta \tan\alpha' + 8x_2}{w_{c0} - w_e} + \frac{4}{\tan\alpha'} + \frac{w_{c0} - w_e}{x_2} \right) x_2 + \left( \frac{2\kappa \tan\beta' + 8x_3 + 8x_4}{w_{c0} - g_b} + \frac{4}{\tan\beta'} + \frac{w_{c0}}{x_3} \right) x_3 \right] U_L \quad (42)$$

#### 2.4.2 峰值承载力

从文献[5]和文献[8]中试件 T-V-N 和 T-H-N 的试验结果来看, 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:

$$M_{pc,co} = \frac{F_{T,co}(3h_1 + 3h_2 + 2h_3 + 2h_4)}{6} \quad (43)$$

$$F_{T,co} = \frac{\sqrt{3}}{3} n_t A_{ev,bh} f_{u,c} \quad (44)$$

式中:  $F_{T,co}$  为等效 T 形件在栓孔冲切破坏模式下的抗拉承载力;  $A_{ev,bh}$  为长圆形螺栓孔在 T 形螺栓头作用下的有效冲切面积;  $f_{u,c}$  为钢管柱极限强度。

在  $M_{pc,co}$  的求解公式(43)和(44)中, 仅有  $A_{ev,bh}$  为未知量, 可由 T 形方颈单边螺栓及其配套长圆形螺栓孔的几何关系中得出, 如图7所示。图7中,  $d_b$  和  $r_b$  分别为 T 形方颈单边螺栓的栓杆直径和半径;  $\lambda_b$  为 T 形方颈单边螺栓的螺栓头长宽比;  $\delta_b$  为 T 形方颈单边螺栓的安装间隙;  $A_{v,bh}$  为长圆形螺栓孔在 T 形螺栓头作用下的理论冲切面积, 即螺栓安装完成后栓孔未变形状态下的理论计算值, 可由下式求得:

$$A_{v,bh} = (\pi d_b - 2\delta_b) t_c \quad (45)$$

事实上, 式(44)中的栓孔有效抗冲切面积  $A_{ev,bh}$  小于式(45)中的理论值  $A_{v,bh}$ , 这是因为栓孔发生冲切破坏时已经出现了膨鼓变形, 而栓孔膨鼓变形势必会导致 T 形螺栓头与栓孔接触面边长的减小, 这在试验结果和有限元结果中均有体现, 如图8所示。

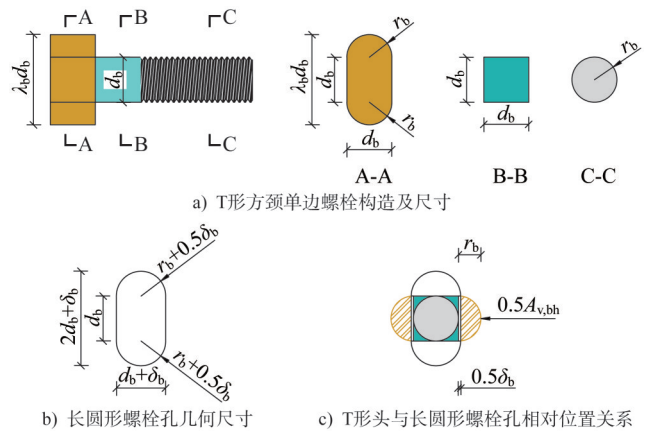


图7 T形方颈单边螺栓及其安装孔的构造和尺寸

Fig. 7 Details and dimensions of T-head square-neck one-side bolt and slotted bolt hole

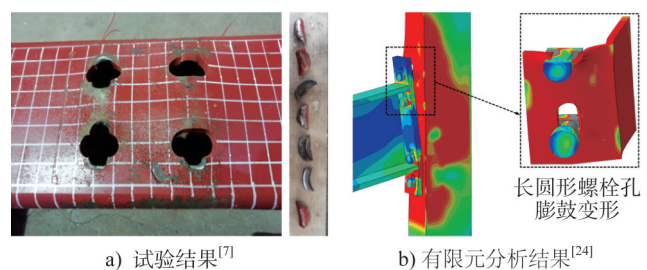


图8 长圆形螺栓孔在拉力作用下的膨鼓变形

Fig. 8 Expansion deformation of slotted bolt holes under tension

因此,在钢板材性不变、栓孔边界条件固定时, $A_{ev,bh}$ 和 $A_{v,bh}$ 之间有如下数学关系:

$$A_{ev,bh} = \chi A_{v,bh} \quad (46)$$

式中: $\chi$ 为螺栓孔有效冲切面积折减系数,且小于1.0。

为求得 $\chi$ ,本节系统分析了文献[6-7]和文献[8]中出现栓孔冲切破坏的试验结果,共整理了6个节点的有效

抗冲切面积折减系数经验值 $\chi_e$ 并列于表2中。

从 $\chi_e$ 的计算结果中可以看出,通过不同类型试验获得的 $\chi_e$ 基本稳定在0.662~0.710(栓孔竖向分布)和0.623~0.667(栓孔水平分布),这意味着公式(46)中的系数 $\chi$ 设置合理,本文建议分别取值0.65和0.60。

表2 有效抗冲切系数经验值 $\chi_e$ 的汇总

Table 2 Summary of empirical values for effective punching coefficient  $\chi_e$

数据来源	编号	栓孔布置方案	$f_{u,c}$ /MPa	$F_p$ /kN	$M_p$ /(kN·m)	$A_{v,bh}$ /mm <sup>2</sup>	$A_{ev,bh}$ /mm <sup>2</sup>	$\chi_e$
WANG等 <sup>[6]</sup> 试验	TV20-7-30	竖向	501.27	318.07	—	411.81	274.76	0.710
	TH20-7-30	水平	501.27	338.24	—	411.81	292.18	0.667
WANG等 <sup>[7]</sup> 试验	TV-7-30	竖向	501.30	309.40	—	411.81	267.27	0.700
	TH-7-30	水平	501.30	333.80	—	411.81	288.35	0.649
SUN等 <sup>[8]</sup> 试验	T-V-N	竖向	392.75	—	101.41	588.30	366.58	0.662
	T-H-N	水平	392.75	—	107.72	588.30	389.39	0.623

### 3 计算公式验算

为验证本文所提出的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的准确性和可靠性,对文献[5]和文献[8]中的节点T-V-N和T-H-N的抗弯承载力进行了理论计算,计算结果与试验结果的对比列于表3中。表中, $M_{y,theory}$ 和 $M_{y,test}$ 分别为节点抗弯承载力的理论计算值和试验值; $M_{y,theory}$ 和 $M_{y,test}$ 分别为

节点屈服弯矩的理论计算值和试验值; $M_{p,theory}$ 和 $M_{p,test}$ 分别为节点峰值弯矩的理论计算值和试验值。此外,考虑到文献[5]和文献[8]中试验节点数量较少,不足以验证本文所提承载力计算方法的可靠度,特增加文献[25]中8个有限元节点模型作为验证。表3中, $M_{FEM}$ 为节点抗弯承载力的有限元计算值。

从表3所列结果中可以看出,各节点抗弯承载力的

表3 文献[5]、[8]、[25]中试件抗弯承载力理论计算值与试验值的比较

Table 3 Comparison of bending bearing capacity between theoretical and experimental values of specimens tested in reference [5, 8, 25]

数据来源	编号	$M_{y,theory}$ / (kN·m)	$M_{p,theory}$ / (kN·m)	$M_{y,test}$ / (kN·m)	$M_{p,test}$ / (kN·m)	$M_{y,FEM}$ / (kN·m)	$M_{p,FEM}$ / (kN·m)	$M_{y,theory}$ / $M_{y,test}$	$M_{p,theory}$ / $M_{p,test}$	$M_{y,theory}$ / $M_{y,FEM}$	$M_{p,theory}$ / $M_{p,FEM}$
SUN等 <sup>[5]</sup>	T-V-N	61.65	91.81	64.06	88.07	—	—	0.962	1.042	—	—
	T-H-N	61.65	91.81	58.69	86.60	—	—	1.050	1.060	—	—
SUN等 <sup>[8]</sup>	T-V-N	61.65	91.81	69.15	101.41	—	—	0.892	0.905	—	—
	T-H-N	61.65	91.81	63.42	107.72	—	—	0.972	0.852	—	—
SUN等 <sup>[25]</sup>	TSOBC-29	45.06	89.26	—	—	51.20	99.47	—	—	0.880	0.897
	TSOBC-30	101.50	133.87	—	—	88.82	143.44	—	—	1.143	0.933
	TSOBC-31	112.40	131.56	—	—	92.42	139.63	—	—	1.216	0.942
	TSOBC-32	73.86	111.56	—	—	76.41	127.37	—	—	0.967	0.876
	TSOBC-33	31.33	111.56	—	—	51.60	87.45	—	—	0.607	1.276
	TSOBC-34	112.40	105.27	—	—	89.49	142.68	—	—	1.256	0.738
	TSOBC-35	90.40	133.87	—	—	88.19	140.68	—	—	1.025	0.952
	TSOBC-36	78.82	133.87	—	—	84.25	120.17	—	—	0.936	1.114
平均值								0.969	0.965	1.004	0.966
标准差								0.056	0.088	0.196	0.152

理论计算值一般小于试验值和有限元值,并且理论计算值与试验值之间的误差保持在15%之内。考虑到结构

设计的安全系数,本文认为节点的承载力理论计算误差在可接受范围之内。由此可见,本文所提出的T形方颈

单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点理论分析模型及计算公式可以较为准确地预测节点的抗弯承载力。

#### 4 结论

本文应用组件分析法和薄板塑性铰线理论建立 T 形方颈单边螺栓连接钢梁-钢管柱节点的抗弯承载力计算方法,可用于此类连接的结构性能预测。主要结论如下:

(1) 应用薄板屈服线理论,提出无肋端板连接下钢管柱壁屈服线分布模式并推导其强度控制下的节点抗弯承载力。

(2) 建议长圆形栓孔竖向分布和水平分布下的有效冲切面积折减系数分别取值 0.65 和 0.60。

(3) 本文提出的节点抗弯承载力计算方法准确可靠,所得的承载力计算值与试验值和有限元值之间的误差保持在 15% 之内。

#### 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.  
SUN Lele. Study on structural performance and design method of T-head square-neck one-side bolted beam to SHS column joints [D]. Jinan: Shandong University, 2023. (in Chinese)
- [2] 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. DOI:10.13206/j.gjg201508006.  
XU Ting, WANG Wei, CHEN Yiyi. A review on foreign research status of one-side bolt [J]. Steel Construction, 2015, 30(8): 27-33. DOI: 10.13206/j.gjg201508006. (in Chinese)
- [3] 陈珂璠,李宇晗,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(1): 27-30.  
CHEN Kefan, LI Yuhan, LU Jinyu. Research progress on the application of blind bolts in structural engineering [J]. Jiangsu Construction, 2016(1): 27-30. (in Chinese)
- [4] 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. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.01.001.  
LIANG Xiaojie, WANG Yan. State-of-the-art on semi-rigid connections for fabricated steel structures [J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(1): 1-14. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.01.001. (in Chinese)
- [5] SUN L L, LIANG Z Q, WANG Q S, 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. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113077.
- [6] WANG P J, SUN L L, ZHANG B X, 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. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106493.
- [7] WANG P J, SUN L L, XIA C X, et al. Cyclic behavior of T-stub connection to hollow section steel column using TSOBs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 185: 106874. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106874.
- [8] SUN L L, LIANG Z Q, 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. DOI: 10.1016/j.job.2021.103104.
- [9] SUN L L, LIANG Z Q, 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. DOI: 10.1016/j.job.2021.103765.
- [10] SUN L L, LIANG Z Q, 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. DOI: 10.1016/j.job.2022.104260.
- [11] 张伯勋. 螺纹锚固单边螺栓端板连接梁柱加强节点力学性能研究[D]. 济南:山东大学, 2022.  
ZHANG Boxun. Experimental studies on thread-fixed one-side bolted endplate connection of beam to hollow square column with strengthening structure [D]. Jinan: Shandong University, 2022. (in Chinese)
- [12] CAI M, LIU L, LI S, et al. Static behavior of TOBs bolted endplate connection to strengthened HSST with fixed thread length [J]. Structures, 2023, 54: 478-498. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.05.069.
- [13] 李国强,段炼,陆焯,等. H型钢梁与矩形钢管柱外伸式端板单向螺栓连接节点承载力试验与理论研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(9): 91-100. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2015.09.012.  
LI Guoqiang, DUAN Lian, LU Ye, et al. Experimental and theoretical study of bearing capacity for extended endplate connections between rectangular tubular columns and H-shaped beams with single direction bolts [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(9): 91-100. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.09.012. (in Chinese)
- [14] 赵均海,樊军超,高伟琪. H型钢梁与矩形钢管混凝土柱平齐式端板单边螺栓连接节点弯矩-转角分析模型[J]. 工程力学, 2021, 38(6): 91-102. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.07.0436.  
ZHAO Junhai, FAN Junchao, GAO Weiqi. Moment-rotation analysis model of flush end-plate bolted connections between h-shaped steel beams and rectangular cfst columns [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(6): 91-102. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2020.07.0436. (in Chinese)
- [15] WANG Z Y, WANG Q Y. Yield and ultimate strengths determination of a blind bolted endplate connection to square hollow section column [J]. Engineering Structures, 2016, 111: 345-369. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.11.058.

- [16] 左凌霄. 采用新型椭圆头单边螺栓连接的梁柱节点受弯承载性能研究[D]. 北京:北京建筑大学,2022.  
ZUO Lingxiao. Study on bending moment of beam-column joints connected by novel oval-headed one-sided bolts [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2022. (in Chinese)
- [17] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-8: Design of Joints; EN 1993-1-8[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [18] D'ANIELLO M, LANDOLFO R, PILUSO V, et al. Ultimate behavior of steel beams under non-uniform bending [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 78: 144-158. DOI:10.1016/j.jcsr.2012.07.003.
- [19] QUINTAS V. Two main methods for yield line analysis of slabs [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2003, 129 (2) : 223-231. DOI:10.1061/(asce)0733-9399(2003)129:2(223).
- [20] GOMES F C T, JASPART J P, MAQUOI R. Moment capacity of beam-to-column minor axis joints [C]// *Proceedings of IABSE International Colloquium on Semi-rigid Structural Connections*. Istanbul:IABSE,1996.
- [21] YEOMANS N F. Rectangular hollow section column connections using the Lindapter Hollo Bolt[C]//*Proceeding of 8th Symposium and Euroconference on Tubular Structures*. Singapore: National University of Singapore, 1998.
- [22] YEOMANS N F. I-beam to rectangular hollow section column T-connections [C]//*Proceeding of 9th International Symposium and Euroconference on Tubular Structures*. Dusseldorf: University of Karlsruhe, 2001.
- [23] WANG P J, SUN L L, LIU M, et al. Experimental studies on thread-fixed one-side bolted connection of beam to hollow square steel tube under static bending moment [J]. *Engineering Structures*, 2020, 214: 110655. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110655.
- [24] SUN L L, LIU M, LIU Y J, et al. Studies on T-shaped one-side bolted connection to hollow section column under bending [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 175: 106359. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106359.
- [25] SUN L L, SHANG Y T, KONG J, et al. Prediction method for bending moment capacities and failure modes of TSOBs bolted I-beam to hollow section square column [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, 214: 108449. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108449.