

# T形头单向螺栓连接T形组件抗拉性能研究

姜鲁青<sup>1</sup>, 杨浩亮<sup>2</sup>, 聂军委<sup>2</sup>, 王建波<sup>3</sup>, 张晋<sup>3</sup>, 孙乐乐<sup>4\*</sup>

(1. 青岛国信发展(集团)有限责任公司, 山东 青岛 266071; 2. 铁正检测科技有限公司, 济南 250014;  
3. 山东大学 土建与水利学院, 济南 250061; 4. 哈尔滨工程大学 烟台研究院, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 新型T形头单向螺栓能够有效解决传统高强螺栓无法直接应用于钢梁-钢管柱栓接节点的问题。然而, 采用此类新型螺栓连接的梁柱节点中各组件承载机理尚不明确, 有待进一步探索。T形头单向螺栓连接节点的特征在于端板及钢管柱壁上具有栓孔形状。为探索此类新型连接节点中端板及钢梁组件的力学响应与承载机理, 文章基于组合法, 通过有限元分析软件ABAQUS对T形件节点的抗拉性能展开了系统的数值分析。主要研究内容和结论如下: 建立了精确的节点三维有限元模型, 研究了T形头单向螺栓连接T形件节点中翼缘出现的5种典型屈服线模式, 并开展了广泛的参数分析。最后基于虚功原理及屈服线理论, 给出T形头单向螺栓连接T形件节点的屈服承载力计算公式。

**关键词:** T形件连接; T形头单向螺栓; 承载机理; 组合法; 数值模拟; 屈服线理论

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)05-0077-11

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20241027001

## Tensile Performance of T-Stub Components with T-Head One-Side Bolts

JIANG Luqing<sup>1</sup>, YANG Haoliang<sup>2</sup>, NIE Junwei<sup>2</sup>, WANG Jianbo<sup>3</sup>, ZHANG Jin<sup>3</sup>, SUN Lele<sup>4\*</sup>

(1. Qingdao Gonson Development (Group) Co., Ltd., Qingdao 266071, China; 2. Tiezheng Testing Technology Co., Ltd., Jinan 250014, China; 3. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;  
4. Yantai Research Institute, Harbin Engineering University, Yantai 264000, China)

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

**Abstract:** The novel T-head one-side bolt can effectively solve the problem that the traditional high-strength bolt cannot be directly applied to the bolted beam to tubular column joints. However, the bearing mechanism of each component in the beam-column joint with this novel bolt is still unclear and needs to be further explored. The T-head one-side bolt is characterized by the shape of the bolt hole on the endplate and tubular column. To explore the mechanical response and bearing mechanism of the endplate and beam components in this novel bolted connection, the finite element analysis software ABAQUS was used to carry out a systematic numerical analysis on the tensile performance of the T-stub connections based on the component method. The main research contents and conclusions are as follows: an accurate three-dimensional finite element model of the connection

收稿日期: 2024-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(52408166), 山东省自然科学基金(ZR2024QE243), 山东省住房城乡建设科技计划(2024KYKF-JZGYH101)

作者简介:

姜鲁青(1972—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事装配式结构和工程管理研究。E-mail: jiangluqing@qdgxjt.com。

杨浩亮(1982—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事装配式结构方面的研究工作。

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研究。E-mail: lelesun117@hrbeu.edu.cn。

was established, and five yield line patterns on the T-stub flange in T-head one-side bolted joint was studied. Finally, the calculation formula for the yield strength of T-stub joints with T-head one-side bolts is given based on the principle of virtual work and the yield line theory.

**Keywords:** T-stub connection; T-head one-side bolt; bearing mechanism; component method; numerical simulation; yield line theory

装配式建筑作为建筑业减排降碳领域的典型代表,受到了广泛关注。装配式建筑是指在工厂或制造基地内将建筑构件(如楼板、墙板、梁柱等)进行预先加工和制造,然后再将其运送到现场进行组装和安装的一种建筑。我国在2017年发布的“十三五规划纲要”<sup>[1]</sup>将装配式建筑列为战略性新兴产业,提出要大力发展装配式建筑的使用。2022年住房和城乡建设部在《城乡建设领域碳达峰实施方案》<sup>[2]</sup>中指出,到2030年装配式建筑占当年城镇新建建筑的比例应达到40%。

钢结构具有轻质高强、工业化程度高等特点,因此钢结构是最适合用于装配式建筑中的结构。钢结构梁柱节点的连接方式有焊接和栓接,其中焊接工作量大、施工作业不便、易受环境影响,焊缝质量难以保证。且焊接节点的性能更接近刚性节点的性能,不利于结构抗震。美国北岭地震<sup>[3]</sup>和日本阪神地震<sup>[4]</sup>都出现了焊接节点断裂这一典型的脆性破坏特征,造成了大量人员伤亡和财产损失,而采用螺栓连接的节点则表现出良好的抗震性能<sup>[5]</sup>。由此可见采用钢结构全螺栓连接的构件节点是未来发展趋势之一。

对于钢结构开口截面类构件,施工人员能够轻易地完成螺栓的安装与拧紧。但是钢管柱等闭口截面构件却因缺乏安装路径而难以实现螺栓的连接。针对该难题,方法一是在柱壁上开设施工手孔,完成螺栓拧紧后补焊。此种做法不但增加了现场焊接量,还破坏了钢管柱构件的完整性。方法二是在钢管柱外焊环板,再通过螺栓连接梁端与环板。该方法会造成钢管柱构件占用空间大、运输困难。基于上述问题,国内外学者提出了一种能够在钢管柱外侧完成安装的螺栓形式,即单向螺栓。尽管目前国内外已经推出十多种单向螺栓,如对拉式单向螺栓<sup>[6-8]</sup>穿透钢管柱后并在外侧完成紧固,该单向螺栓构造简单且强度高,但预紧力的施加会造成钢管柱变形。套管锚固单向螺栓<sup>[9]</sup>技术成熟、研究全面且力学性能优异,但其作为进口产品,应用成本较高,而且该类螺栓可变形套管长度的选取受限。折叠垫片单向螺栓<sup>[10]</sup>中不存在明显的薄弱部件,该螺栓的力学性能可与传统螺栓的力学性能相媲美,具有很大的应用价值。但该螺栓中较多的组件、特制的安装工具在一定程度上影响了其施工效率。针对上述难题,SUN等<sup>[11]</sup>在不降低施工效率的前提下提出了新型T形头单向螺栓。T形头单向螺栓的配套栓孔为长圆形栓孔,栓杆制作工艺及规格与传统高强螺栓相同。

然而目前针对T形头单向螺栓连接节点的研究仍较为匮乏,T形头单向螺栓端板连接钢梁-钢管柱节点中各组件的承载机理尚未明确,节点中不同组件破坏的设计方法尚未被给出。因此,本文基于欧洲规范EC 3<sup>[12]</sup>中的组件法,聚焦于端板组件,通过T形件节点进行研究。本文具体的研究内容如下:通过有限元分析软件ABAQUS<sup>[13]</sup>开展对T形头单向螺栓连接T形件节点的研究。通过系统的参数分析以评估不同参数对节点力学响应的影响,从而评估节点应用的可行性。基于数值分析结果,结合屈服线理论以完善节点的设计方法,以达到推动其进一步工程应用的目标。

## 1 节点有限元模型建立

### 1.1 几何模型

T形头单向螺栓连接节点组件包括由钢梁翼缘和端板简化而成的目标T形件、由钢管简化而成的底座T形件以及T形头单向螺栓。由于本文所研究节点的几何形状、边界条件和施加荷载均对称,因此仅建立1/4节点模型以节约计算成本,如图1所示。

几何模型将螺栓头、螺栓杆、螺母组合建立为“哑铃型”整体,该简化建模方法已被国内外学者广泛采用<sup>[14-16]</sup>。T形件腹板(钢梁翼缘)与T形件翼缘(外伸端板)之间一般通过角焊缝连接。考虑到在节点静力承载性能研究中一般不考虑焊接残余应力和焊缝热影响区材料性的变化,部分学者<sup>[17-19]</sup>对该模型进一步简化,忽略T形件角焊缝的连接再进行建模。为将研究对象聚焦于端板组件,T形件节点中底座T形件翼缘厚度取30 mm以避免变形。长圆形螺栓头的长短轴之比选择1.7,且目标T形件以及底座T形件中长圆形螺栓孔尺寸均相同,相比螺栓头长短轴的长度增大了2 mm。

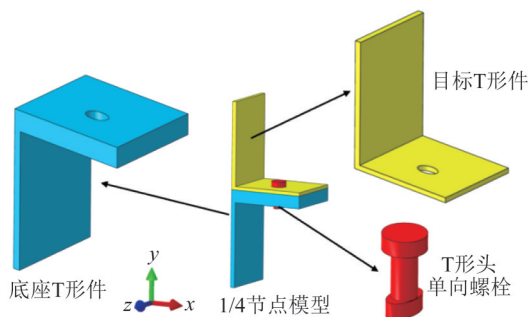


图1 ABAQUS中建立的有限元模型

Fig. 1 Finite element models developed in ABAQUS

众多学者<sup>[20-22]</sup>的研究结果表明采用图2所示的双折线模型能够准确模拟钢材的应力应变关系,在简化分析非线性程度、缩短计算时间的同时能准确模拟螺栓连接的力学响应,其数学表达式如式(1)所示。本文各组件选用理想材性,即假设材料是均匀和各向同性的,且忽略材料内部结构的影响,其屈服强度、极限强度及弹性模量如表1所示。

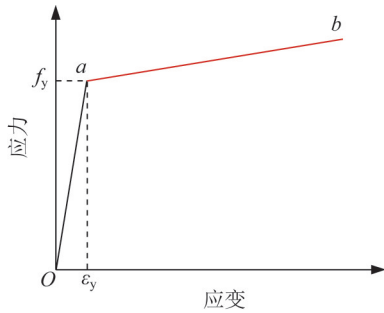


图2 钢材应力-应变关系

Fig. 2 Stress-strain relationship of steel

$$\sigma = \begin{cases} E_s \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_y \\ f_y + 0.01E_s(\epsilon - \epsilon_y) & \epsilon > \epsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $E_s$  为钢材弹性模量;  $f_y$  为钢材屈服强度;  $\sigma$  和  $\epsilon$  为钢材的应力和应变;  $\epsilon_y$  为钢材屈服时的应变。

T形件节点各组件之间的接触均采用面面接触。在

表1 各组件材性

Table 1 Material properties of each component

组件	屈服强度	极限强度	弹性模量
T形件	235	375	206 000
钢管柱	235	375	206 000
T形头单向螺栓	660	830	206 000

接触属性设置中,法向行为采用硬接触;切向行为采用库伦摩擦模型,接触面摩擦系数取《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)<sup>[23]</sup>推荐的最小值0.3。模型中各部件均采用3维8节点缩减积分(C3D8R)实体单元来模拟,且材料性质为各向同性。螺栓预紧力的大小为125 kN,符合国家规范《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)<sup>[23]</sup>。

### 1.2 模型验证

为验证本文所建立有限元模型的准确性及可靠性,本节选取王燕等<sup>[24]</sup>报道的试验结果进行数值模型验证。如图3所示,由于有限元模型选用的是简化后的应力-应变关系和理想材料属性,有限元所得的节点荷载-位移曲线与试验结果有较小的误差,但仍表现出良好的一致性。且其变形与破坏同样与试验结果相近,表明本节所采用有限元建模方法具有一定的准确性与可靠性。

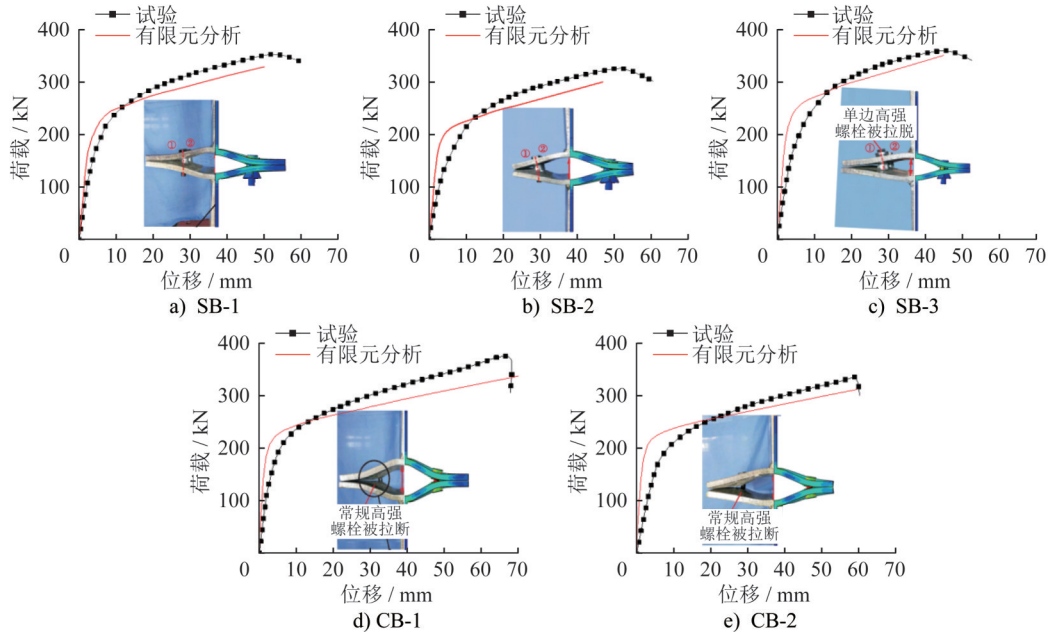


图3 荷载-位移曲线对比

Fig. 3 Comparison of load-displacement curves

## 2 节点的抗拉性能研究

### 2.1 破坏模式

根据欧洲规范 EC 3<sup>[12]</sup>,传统高强螺栓连接T形件节

点的破坏模式被归纳为三类,分别是:(1) T形件翼缘完全屈服破坏;(2) 翼缘屈服破坏伴随螺栓杆断裂破坏;(3) 螺栓杆断裂破坏。为确定T形头单向螺栓连接T形

件节点在不同破坏模式下的工作机理,选取文献[24]中数据如表2所示。节点CB-1的试件及材料信息作为数值分析的基准,具体

表2 试件CB-1的基本尺寸[24]
Table 2 Basic size of specimen CB-1[24]

Table with 7 columns: 试件编号, T形件几何尺寸 (tw/tf, e1/mm, e2/g1, g2/mm), 螺栓种类, 螺栓直径D/mm, 螺栓孔直径/mm. Row 1: CB-1, 14, 84, 84, 112, CB-8.8, 16, 18.

注:CB代表传统高强螺栓;8.8代表螺栓强度等级为8.8级;tw及tf分别表示T形件腹板厚及翼缘厚;e1、e2、g1及g2分别表示螺栓竖向边距、螺栓竖向间距、螺栓横向边距及横向间距。

考虑到T形头单向螺栓制备工艺与传统高强螺栓制备工艺完全相同,因此本文仅研究T形件破坏模式(1)和(2)。其中,T形头单向螺栓采用型号为S8.8级M20的高强螺栓,其螺栓头长短径长度分别为34mm和20mm。EC3[12]中明确指出,T形件节点的破坏模式主要受其翼缘厚度的影响。本节选取的T形件翼缘厚度为4~20mm,结果表明增大翼缘厚度能够显著提高T形头单向螺栓连接T形件节点的承载能力,如图4所示。

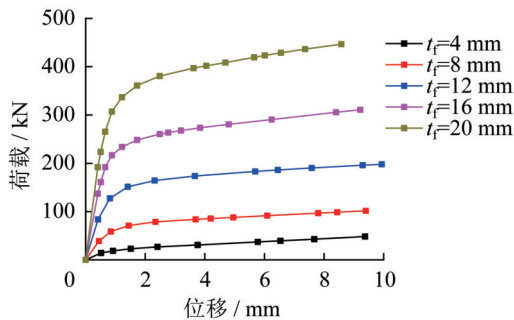


图4 不同翼缘厚度下的T形件荷载-位移曲线
Fig. 4 Load-displacement curves of T-stub with various flange thicknesses

当翼缘较薄时,节点的破坏模式为T形件翼缘完全屈服。当翼缘厚度增大至16mm时,T形件破坏模式转变为翼缘破坏伴随螺栓屈服。以翼缘厚度为8mm及20mm时节点的破坏模式作为两种破坏模式的代表,应力分布如图5所示。对于发生翼缘完全屈服破坏时,节点的第一个塑性铰于翼缘及腹板交界处形成,第二个塑性铰则在螺栓孔处形成。当T形件的竖向位移较大时,翼缘出现横向滑移进而带动栓杆偏移及旋转。而对于发生翼缘屈服伴随螺栓破坏时,塑性铰仅在翼缘与腹板交界处形成,螺栓杆在翼缘的撬起作用下发生弯曲变形及颈缩直至断裂。

2.2 屈服线模式

屈服线理论是一种用于预测板件平面外受弯承载能力的分析方法。本节选取翼缘厚度为8mm的T形件

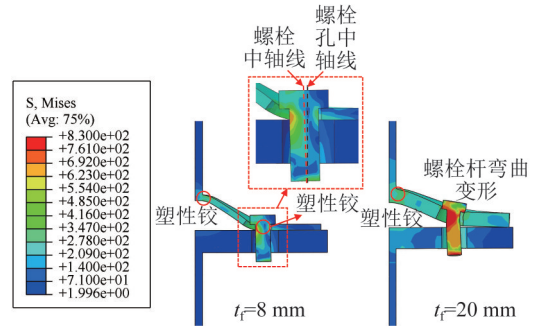


图5 翼缘厚度8mm及20mm节点的应力云图(单位:MPa)

Fig. 5 Mises stress contours of connections with flange thicknesses of 8 mm and 20 mm (unit: MPa)

节点,对翼缘中的多个尺寸进行参数分析以确定不同参数尺寸下T形件翼缘的屈服线模式。研究参数包括:(1)螺栓竖向间距e2、(2)螺栓竖向边距e1、(3)螺栓横向间距g2、(4)螺栓横向边距g1。尽管《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)[23]中对螺栓间距及边距的最大值和最小值作出了如表3所示的规定,但为发现更多的T形件翼缘屈服线模式,参数分析中各参数取值可能超出规范规定。

表3 螺栓孔距、边距和端距容许值(部分)

Table 3 Allowable values for hole spacing, edge spacing, and end spacing of bolts (partial)

Table with 4 columns: 名称 (Name), 位置和方向 (Position and Direction), 最大容许间距 (Maximum Allowable Spacing), 最小容许间距 (Minimum Allowable Spacing). Rows include: 中心间距 (Center-to-center spacing) for 外排 (Outer row) and 中间排顺内力方向(拉力) (Inner row along force direction); 中心至边缘 (Center-to-edge) for 顺内力方向 (Along force direction).

注:d0指传统高强螺栓配套圆形螺栓孔的直径,t为较薄板的板厚。

根据有限元分析结果,共发现5种典型的屈服线模式,即圆形连通屈服、双线型屈服、端部连通屈服、圆形独立屈服及端部独立屈服,如图6所示。需要说明的是,节点命名规则为:M-e1×e2-g1×g2。

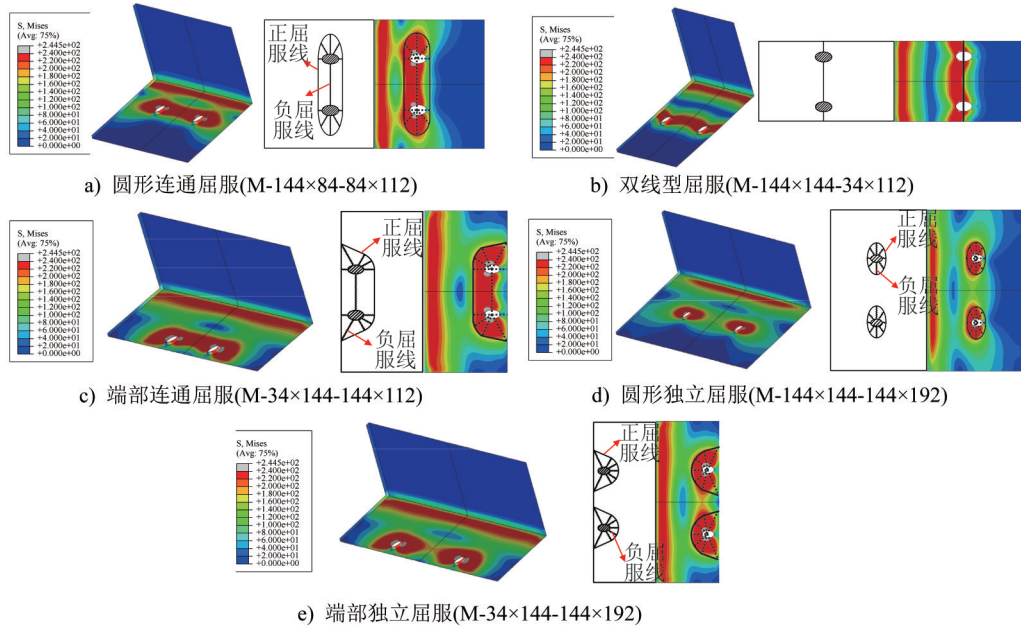


图 6 典型的 T 形件屈服线模式 (单位: mm)

Fig. 6 Typical yield line patterns of T-stubs (unit: mm)

圆形连通屈服模式的屈服区域分布在螺栓孔周且沿翼缘横向连通; 双线型屈服模式表现为螺栓孔连线处翼缘全截面屈服; 端部连通屈服模式的屈服区域同样分布在孔周, 但其螺栓外侧翼缘同时屈服; 圆形独立屈服模式的屈服区域仅分布在孔周; 端部独立屈服模式表现为孔周及螺栓孔外侧翼缘屈服。

### 2.3 与传统高强螺栓连接 T 形件节点对比

选取 2.2 节中 5 种典型屈服线模式的节点, 替换其螺栓及螺栓孔为 S8.8 M20 传统高强螺栓及配套螺栓孔并进行有限元分析, 相应节点编号用 TB 进行区分。各节点荷载-位移曲线汇总如图 7 所示。

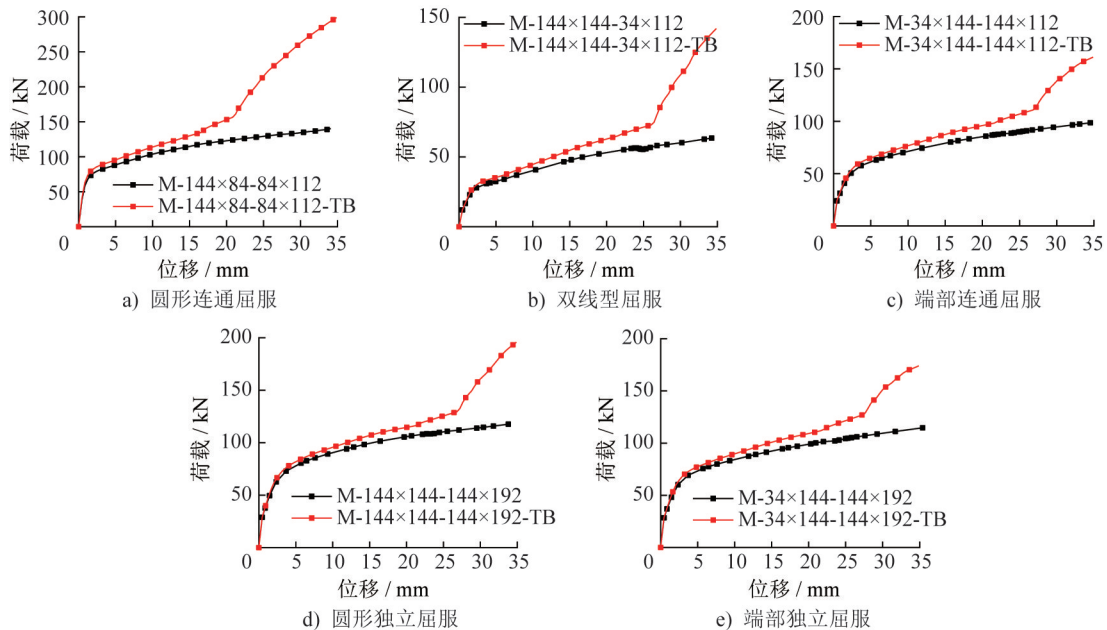


图 7 不同类型螺栓连接 T 形件荷载-位移曲线对比

Fig. 7 Comparison of load-displacement curves between T-stub connections with different types of bolts

在五种屈服线模式下, 传统螺栓连接节点与 T 形头单向螺栓连接节点的初始刚度基本相同。当 T 形件的位

移较小时 (10 mm 位移之前), 传统高强螺栓连接节点承载能力略高于 T 形头单向螺栓连接节点承载能力, 且前

者荷载-位移曲线的硬化分支斜率要高于后者荷载-位移曲线的硬化分支斜率。

当 T 形件位移进一步增大时,两类节点荷载-位移曲线之间的差距增大,直至传统高强螺栓连接 T 形件节点的荷载-位移曲线发生转折,该转折点之后为荷载-位移曲线的第二硬化分支。

第二硬化分支是 T 形件翼缘在较大位移下发生翼缘平面内的滑移导致栓孔壁挤压栓杆引起的。此时传统高强螺栓连接 T 形件节点的承载模式从翼缘受弯变为螺栓与栓孔之间的挤压。而长圆形螺栓孔长轴方向尺寸较大,翼缘滑移距离也更大,从而避免了荷载-位移曲线第二硬化分支出现,如图 8 所示(以节点 M-144 mm × 84 mm-84 mm × 112 mm 及 M-144 mm × 84 mm-84 mm × 112 mm-TB 为例)。

两类节点屈服承载力及其差值如表 4 所示。采用 T 形头单向螺栓连接 T 形件节点的屈服承载力较传统高强螺栓连接节点的屈服承载力低 5.4%~9.5%。考虑到此类螺栓在现场粗放式的施工环境中能有良好的适应性以及较大的便利性,因此该承载力折减可以被接受。

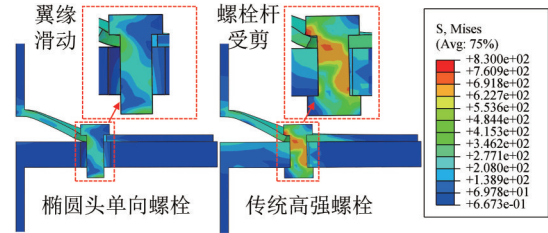


图 8 30 mm 位移下节点应力云图 (单位:MPa)  
Fig. 8 Mises stress contours of connections at the displacement of 30 mm (unit:MPa)

表 4 不同类型螺栓连接 T 形件屈服承载力对比

Tab. 4 Comparison of yield bearing capacity of T-stub connection with different types of bolts

屈服线模式	圆形连通屈服	双线性屈服	端部连通屈服	独立圆形屈服	独立端部屈服
单向螺栓连接 T 形件节点屈服承载力/kN	73.3	25.9	52.7	67.7	64.1
传统高强螺栓连接 T 形件节点屈服承载力/kN	79.2	27.3	56.1	73.6	70.2
承载力折减/%	8.1	5.4	6.5	8.7	9.5

### 3 参数分析

#### 3.1 螺栓孔布置方向的影响

T 形头单向螺栓所配套的栓孔呈长圆形,其长短轴的区别决定了节点中栓孔布置的方案不同。因此本节对长圆形螺栓孔三种布置方案下 T 形件节点的抗拉性能进行分析,三种方案如图 9 所示。

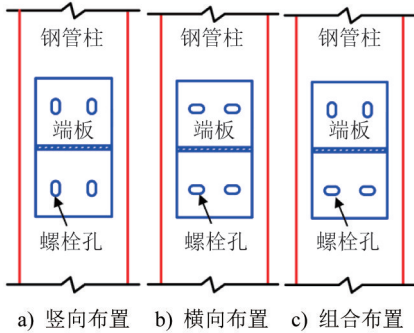


图 9 不同的螺栓孔布置方案

Fig. 9 Different types of bolt hole layouts

选取 5 种典型屈服线模式节点作为基准,研究不同螺栓孔布置方案对 T 形件节点力学性能的影响。如图 10 所示,螺栓孔不同布置方式对 T 形件的初始刚度及屈服承载力几乎无影响。竖向布置螺栓孔及单侧布置且有竖向螺栓孔的混合布置方式下的翼缘螺栓孔壁与螺栓间有

较大间隙同时能够发生相对滑移。而横向布置螺栓孔孔壁与螺栓间距较小,使得相应的荷载-位移曲线迅速出现第二硬化分支。

图 11 为不同螺栓孔布置形式的节点 M-144 mm × 84 mm-84 mm × 112 mm 在 T 形件位移为 30 mm 时的翼缘及螺栓偏移。其中混合布置下竖向螺栓孔内螺栓的滑移距离最大,这是因为混合布置一侧的横向螺栓孔限制了孔内螺栓滑移,导致滑移变形集中于另一侧竖向螺栓孔中。相比于竖向螺栓孔内螺栓易发生滑移,横向螺栓孔内螺栓会受到螺栓孔孔壁限制。此外,螺栓孔方向的改变未对节点屈服线模式产生影响,印证了螺栓孔布置方式对节点荷载-位移曲线基本不产生影响的结论,如图 12 所示。综上,考虑到螺栓孔布置方式对 T 形件的初始刚度及屈服承载力几乎无影响,工程实践中不对栓孔布置方向做出要求。

#### 3.2 螺栓安装精度 $\delta_b$ 的影响

传统高强螺栓和 T 形头单向螺栓的安装精度均由螺栓与栓孔的安装间隙  $\delta_b$  决定。本节选取典型屈服线模式节点,探究安装间隙  $\delta_b$  对 T 形件节点力学性能的影响。安装间隙的选取依据国家标准《紧固件 螺栓和螺钉通孔》(GB/T 5277—1985)<sup>[25]</sup>,如表 5 所示。

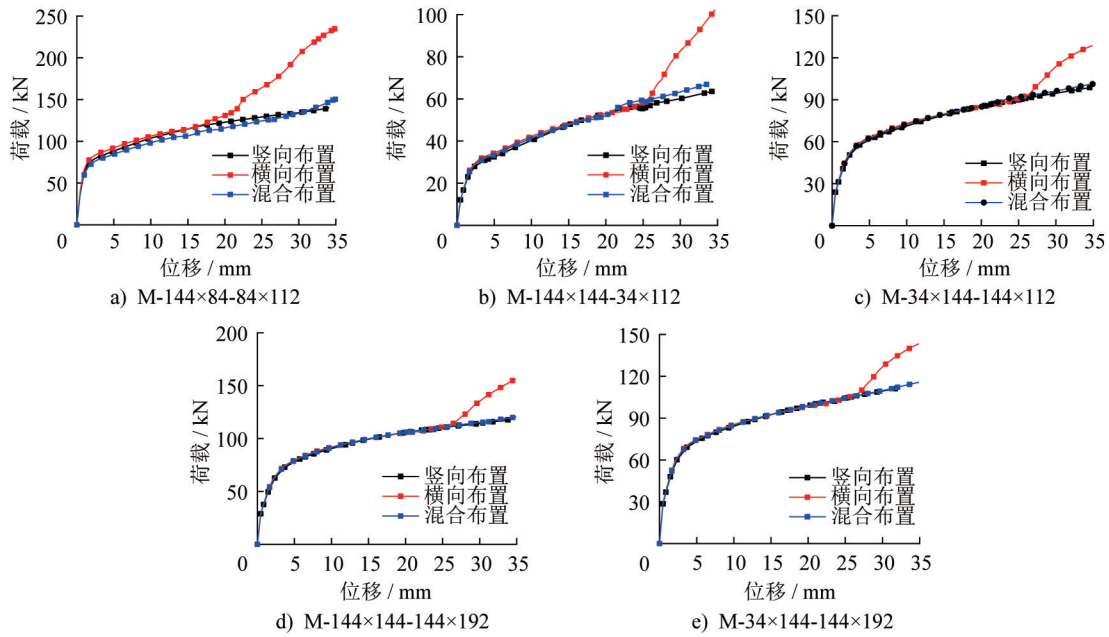


图 10 不同螺栓孔布置方式下T形件荷载-位移曲线

Fig. 10 Load-displacement curves of T-tub connections with different bolt hole layouts

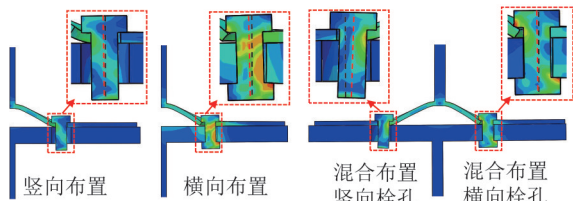


图 11 不同螺栓孔布置方式下翼缘及螺栓偏移

Fig. 11 Offsets of flange and bolt under different bolt layouts

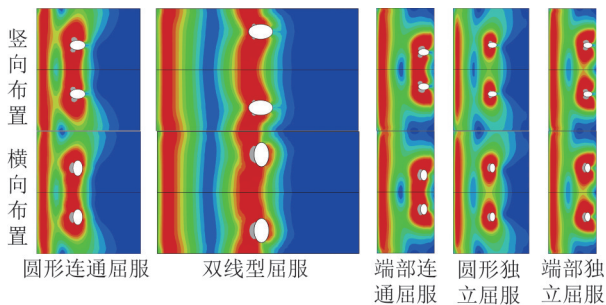


图 12 不同螺栓孔布置方式的屈服线模式对比

Fig. 12 Comparison of yield line patterns with different bolt hole arrangements

表 5 钢结构高强螺栓安装间隙

Table 5 Installation gaps for high-strength bolts in steel structures

螺栓公称直径	M16	M20	M22	M24
精装配	1.0	1.0	1.0	1.0
安装间隙 $\delta_b$ 中等装配	1.5	2.0	2.0	2.0
粗装配	2.5	4.0	4.0	4.0

如图 13 所示,在不同安装间隙下的荷载-位移曲线均表明随着安装间隙的增大会导致节点承载性能下降。将各节点的屈服承载力汇总于表 6,发现各节点屈服承载力的下降幅度均小于 5%,以节点 M-144 mm-84 mm-84 mm-112 mm 为例。此外,螺栓孔尺寸的增大没有使节点塑性变形区域出现明显扩张变化,屈服线模式也无变化,如图 14 所示。由于提高安装精度对节点性能提高较小,工程实践中考虑粗装配即可。

### 3.3 螺栓旋转偏差角 $\alpha_b$ 的影响

在 T 形头单向螺栓安装后,螺母的施拧可能会带动栓杆一同旋转从而导致栓头旋转偏差,本文称之为螺栓旋转偏差角  $\alpha_b$ 。以 M-144 mm×84 mm-84 mm×112 mm 为基准节点,对旋转偏差角为  $0^\circ\sim 20^\circ$  的 T 形件节点进行研究。结果如图 15 所示,各节点荷载位移曲线几乎重合,这表明  $20^\circ$  以内的旋转偏差角几乎不会对节点的抗拉性能产生影响。综上,工程实践只需保证旋转偏差角在  $20^\circ$  以内即可。

### 3.4 接触面摩擦系数 $\mu$ 的影响

在 T 形件翼缘变形过程中,可能会发生一段较大距离的滑移。因此,本节以 M-144 mm×84 mm-84 mm×112 mm 为基准节点研究不同的摩擦系数对 T 形件节点抗拉性能的影响。摩擦系数的选取遵照国家标准《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)<sup>[23]</sup>,如表 7 所示。

如图 16 所示,增大摩擦系数能改善 T 形件节点的力学性能。摩擦系数由 0.30 提高到 0.45 时节点的屈服承载力略有提升,但伴随施加位移的增大,T 形件承载能力的

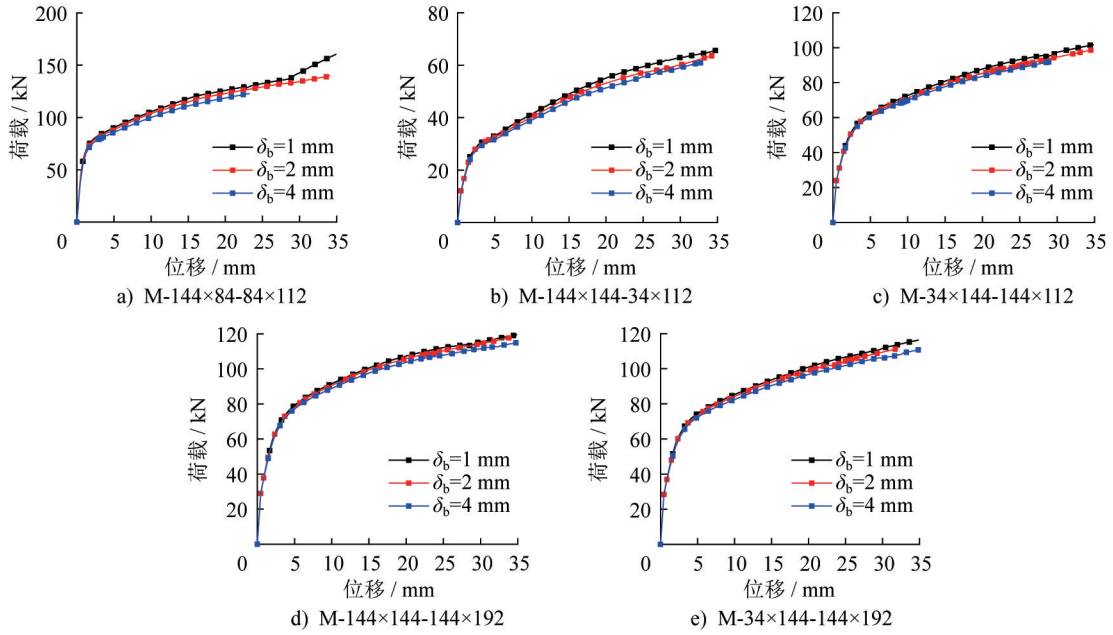


图 13 不同安装间隙下 T 形件节点荷载-位移曲线

Fig. 13 Load-displacement curves of T-stub connections with various installation gaps

表 6 不同安装间隙下 T 形件节点的屈服承载力

**Table 6 Yield bearing capacity of T-stub connections with various installation gaps** kN

$\delta_b$ /mm	M-144×84-84×112	M-144×144-34×112	M-34×144-144×112	M-144×144-144×192	M-34×144-144×192
1	74.6	26.2	53.1	67.9	118.5
2	73.3	25.9	52.7	67.7	116.8
4	73.1	25.7	52.1	67.1	116.3

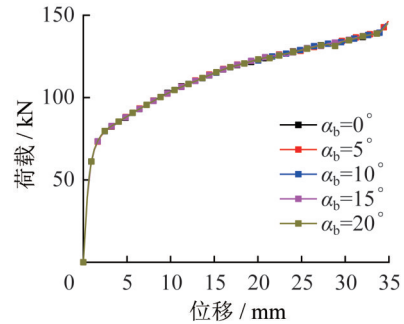


图 15 不同旋转角下 T 形件节点荷载-位移曲线

Fig. 15 Load-displacement curves of T-stub connections with various rotational angles

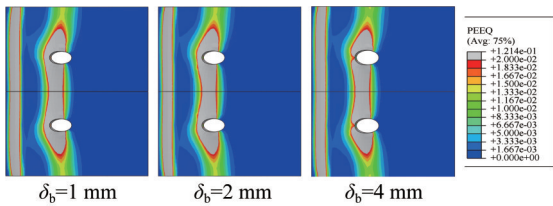


图 14 不同安装间隙下 T 形件等效塑性应变分布

Fig. 14 Equivalent plastic strain distribution of T-stubs with various installation gaps

表 7 钢材接触面的摩擦系数

Table 7 Friction coefficients of contact surface of steel

连接处构件接触面的处理方法	钢材牌号		
	Q235	Q355	Q420
喷硬质石英砂或铸钢棱角砂	0.45	0.45	0.45
抛丸(喷砂)	0.40	0.40	0.40
钢丝刷清楚浮锈或未经处理的干净轧制面	0.30	0.35	—

改善越发显著。综上,在工程实践中推荐采用接触面摩擦系数较大的构件。

### 3.5 螺栓孔内偏移 $\delta$ 的影响

在安装过程中, T 形头单向螺栓可能会沿螺栓孔长轴方向发生滑动偏移的现象,如图 17 所示。M20 螺栓在配套等级精度为中等装配精度的螺栓孔下其栓杆孔内最大偏移距离为 8 mm。

选取 M-144 mm×84 mm-84 mm×112 mm 为基准

节点,研究当螺栓发生竖向偏移时对 T 形件节点抗拉性能的影响。在 T 形件位移达到 20 mm 之前,螺栓孔内发生偏移后对荷载位移曲线未产生影响;当位移继续增大时,荷载位移曲线出现差别,如图 18 所示。而此时 T 形件位移已大于 20 mm,超出梁柱节点中端板正常使用状态下的最大位移。因此在工程实践中可不考虑螺栓发生孔内偏移时对抗拉节点性能产生的影响。

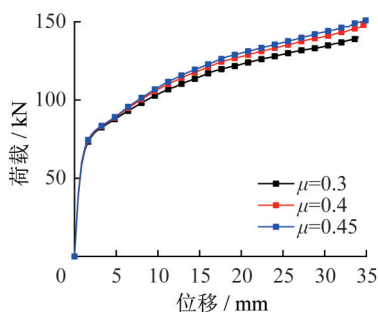


图 16 不同摩擦系数下节点荷载-位移曲线

Fig. 16 Load-displacement curves of connections with different friction coefficients

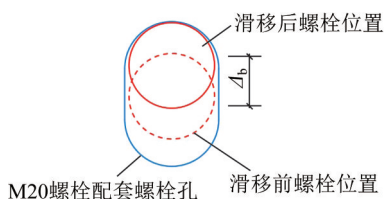


图 17 孔内螺栓偏移

Fig. 17 Bolt offset in bolt hole

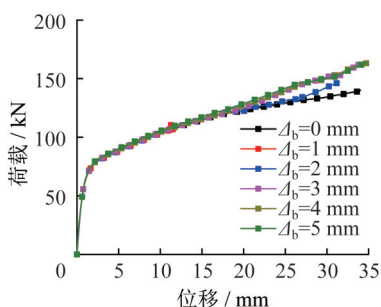


图 18 不同偏移距离下T形件节点的荷载-位移曲线

Fig. 18 Load-displacement curves of T-stub connections with various offset distances

图 19 为栓杆孔内偏移距离为 6 mm 时的 T 形件在 35 mm 位移位置处荷载下的变形。由于孔内螺栓均向左侧发生偏移,左侧螺栓与 T 形件腹板间距要大于右侧螺栓与腹板的间距,这导致 T 形件翼缘在加载过程中会发生腹板中轴线偏离底座 T 形件中轴线的情况。可能会出现 T 形件一侧翼缘先于另一侧翼缘的破坏形态。

## 4 节点承载力理论分析

### 4.1 理论模型

T 形头单向螺栓连接 T 形件具有传统高强螺栓连接 T 形件节点所具有的 3 类破坏模式,其中 T 形件翼缘完全屈服及翼缘屈服伴随螺栓杆断裂两种破坏模式下 T 形件节点的力学模型如图 20 所示。

根据力学平衡可得到螺栓连接 T 形件节点在翼缘完全屈服及翼缘屈服伴随螺栓杆断裂的屈服这两种破坏模式下的强度计算公式,见式(2)和(3)。

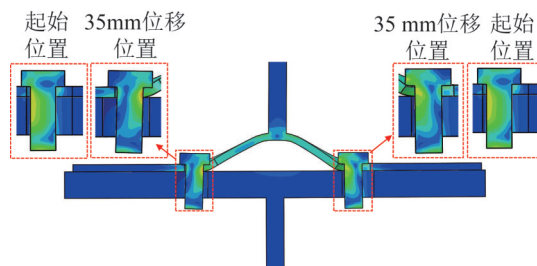


图 19 偏移距离 6 mm 下 T 形件节点变形

Fig. 19 Deformation of T-stub connection with the bolt offset distance of 6 mm

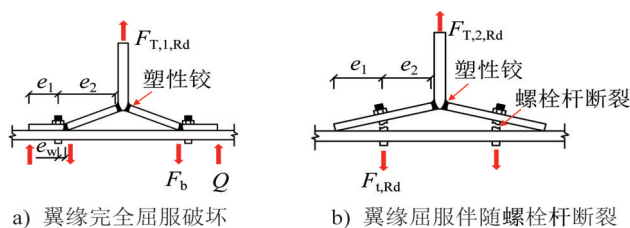


图 20 T 形件破坏模式

Fig. 20 Failure modes of T-stubs

$$F_{T,1,Rd} = \frac{(8e_1 - 2e_w)M_{pl,1,Rd}}{2e_1e_2 - e_w(e_1 + e_2)} \quad (2)$$

式中: $F_{T,1,Rd}$ 为 T 形件节点在翼缘完全屈服破坏模式下的承载力; $M_{pl,1,Rd}$ 为在翼缘完全屈服破坏模式下的抗弯承载力; $e_1$ 和 $e_2$ 为螺栓竖向边距和螺栓竖向间距; $e_w$ 为螺栓头直径的 1/4。

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + e_1(\sum F_{t,Rd})}{e_1 + e_2} \quad (3)$$

式中: $F_{T,2,Rd}$ 为 T 形件节点在翼缘屈服伴随螺栓断裂破坏模式下的承载力; $M_{pl,2,Rd}$ 为在翼缘屈服伴随螺栓断裂破坏模式下的抗弯承载力; $\sum F_{t,Rd}$ 为螺栓的总承载力。

$$M_{pl,Rd} = 0.25 \sum l_{eff} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} \quad (4)$$

式中: $M_{pl,Rd}$ 为翼缘在不同屈服线模式下的抗弯承载力; $l_{eff}$ 为翼缘屈服线的有效长度之和; $t_f$ 为 T 形件节点中目标翼缘厚度; $f_y$ 为翼缘的屈服强度; $\gamma_{M0}$ 为折减系数,通常取 1.1。

$$\sum F_{t,Rd} = n_b f_{yb} \frac{\pi D^2}{4} \quad (5)$$

式中: $n_b$ 为螺栓数量; $f_{yb}$ 为螺栓屈服强度; $D$ 为螺栓直径。

欧洲规范 EC 3<sup>[12]</sup>给出了传统高强螺栓连接 T 形件翼缘在不同模式下的屈服线有效长度计算公式,见式(6)~(8)。本文 2.3 节分析结果表明 T 形头单向螺栓连接 T 形件节点的屈服承载力较传统高强螺栓连接 T 形件节点的屈服承载力低 5.4%~9.5%。考虑到更大的螺栓孔会缩短屈服线长度,将折减系数 $\gamma_{M0}$ 修正为 1.2 以估计此新型节点中 T 形件的承载力。

$$l_{\text{eff,cp}} = \begin{cases} 4\pi e_2 & \text{圆形独立屈服} \\ 2\pi e_2 + 4e_1 & \text{端部独立屈服} \\ 2\pi e_2 + 2g_2 & \text{圆形连通屈服} \end{cases} \quad (6)$$

$$l_{\text{eff,nc}} = \begin{cases} 2g_1 + g_2 & \text{双线型屈服} \\ 8e_2 + 2.5e_1 & \text{端部独立屈服} \\ 4e_2 + 1.25e_1 + g_2 & \text{端部连通屈服} \end{cases} \quad (7)$$

$$l_{\text{eff}} = \min(l_{\text{eff,cp}}, l_{\text{eff,nc}}) \quad (8)$$

式中： $g_1$ 及 $g_2$ 分别表示螺栓横向边距及横向间距。

## 4.2 公式验证

图21为T形件节点的计算结果对比。其中 $F_{y,FE}$ 为T形件在有限元中节点的屈服承载力, $F_y$ 是T形件通过理论计算得到节点的屈服承载力。其中,T形件节点的屈服承载力误差范围为 $-19.6\% \sim 12.4\%$ ,误差平均值为 $2.3\%$ ,误差标准差为 $6.4\%$ 。可见理论计算结果与有限元分析结果吻合较好,误差基本控制在 $10\%$ 以内。较小的标准差也表明该计算公式具有良好的稳定性。另考虑到各组件分析模型因简化等方面的影响,认为误差在可接受的范围。

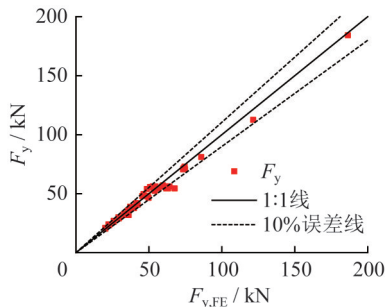


图21 计算结果与有限元分析结果对比

Fig. 21 Comparison between calculated results and finite element analysis results

## 5 结论

基于组件法思想,本文对新型单向螺栓端板连接梁柱节点中的外伸端板组件力学性能及承载机理展开了数值模拟研究,并通过大量有限元参数分析对节点的力学性能进行评估。最后,通过理论分析建立了此类节点的屈服承载力计算公式。本文的主要结论如下:

(1) T形头单向螺栓连接T形件节点翼缘共出现了五种典型的屈服线模式:圆形连通屈服、双线型屈服、端部连通屈服、圆形独立屈服及端部独立屈服,且T形件翼缘屈服线模式会受到螺栓竖向边距和翼缘宽度大小的显著影响。翼缘屈服破坏模式下T形头单向螺栓连接T形件节点的抗拉屈服承载力较传统高强螺栓连接节点的抗拉屈服承载力折减小于 $10\%$ 。

(2) 本文参数分析结果表明:螺栓孔采用竖向布置

方案布置的节点表现出最佳力学性能;栓杆孔内旋转偏差小于 $20^\circ$ 时对节点力学性能无影响;栓杆孔内偏移对节点整体力学性能基本也无影响,但会导致T形件腹板两侧翼缘受力及变形不均;较大的安装间隙对节点承载能力的削弱较小,特殊情况下可采用粗装配以提高安装效率;推荐采用接触面摩擦系数较大的钢材进行工程实践。

(3) 基于屈服线理论预测了T形头单向螺栓连接T形件节点的屈服承载力,通过与有限元分析结果对比验证了力学模型和计算公式的准确性和可靠性。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于印发《“十三五”装配式建筑行动方案》《装配式建筑示范城市管理办法》《装配式建筑产业基地管理办法》的通知:建科[2017]77号[A].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2017.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Notice from the Ministry of Housing and Urban-Rural Development on Issuing the Action Plan for Prefabricated Buildings during the 13th Five Year Plan Period, the Management Measures for Prefabricated Building Demonstration Cities, and the Management Measures for Prefabricated Building Industry Bases: Jianke [2017] No.77 [A]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2017. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城乡建设领域碳达峰实施方案[A/OL]. (2022-06-30). [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/13/content\\_5700752.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/13/content_5700752.htm).  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Implementation plan for carbon peak in urban and rural construction[A/OL]. (2022-06-30). [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/13/content\\_5700752.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/13/content_5700752.htm). (in Chinese)
- [3] MILLER D K. Lessons learned from the northridge earthquake[J]. Engineering Structures, 1998, 20(4-6): 249-260. DOI:10.1016/S0141-0296(97)00031-X.
- [4] TREMBLAY R, FILIATRAULT A, BRUNEAU M, et al. Seismic design of steel buildings: Lessons from the 1995 hyogo-Ken Nanbu earthquake[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, 23(3): 727-756. DOI:10.1139/196-885.
- [5] 何团结. 全装配式方钢管梁柱节点抗震性能研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023.  
HE Tuanjie. Seismic performance test of fully assembled square steel tube beam-column joints [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [6] 王先铁. 新型方钢管混凝土柱-钢梁节点性能研究及抗震设计对策[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.  
WANG Xiantie. Behavior research and aseismic design criterion on new type connections of concrete-filled square

- tubular column and steel beam[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2007. (in Chinese)
- [7] 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. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.07.014.
- HE Yibin, HUANG Pin, GUO Jian, et al. Experimental study on seismic behavior of steel-reinforced concrete square column and steel beam joint with bolted end-plate[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 116-125. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.07.014. (in Chinese)
- [8] 杨晓杰, 张龙, 李国强, 等. 矩形钢管柱与H形梁端板对拉螺栓连接滞回性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(4): 16-23. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9379.2013.04.003.
- YANG Xiaojie, ZHANG Long, LI Guoqiang, et al. Hysteretic performance of end plate connections between rectangular hollow section columns and H-shaped beams using through-bolts[J]. Progress in Steel Building Structures, 2013, 15(4): 16-23. DOI: 10.3969/j.issn.1671-9379.2013.04.003. (in Chinese)
- [9] KOROL R M, GHOBARAH A, MOURAD S. Blind bolting W-shape beams to HSS columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(12): 3463-3481. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(1993)119:12(3463).
- [10] HOSSEINI S M, MAMUM M S, MIRZA O, et al. Behaviour of blind bolt shear connectors subjected to static and fatigue loading [J]. Engineering Structures, 2020, 214: 110584. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110584.
- [11] 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.
- [12] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-8: design of joints: BS EN 1993-1-8[S]. Brussels, 2004.
- [13] Abaqus-Inc. Abaqus/CAE User's Guide, Version 2016 [EB/OL]. (2016) [2022-08-30]. <http://130.149.89.49:2080/v2016/books/usi/default.htm>.
- [14] YAPICI O, THEOFANOUS M, AFSHAN S, et al. Numerical modelling of stainless steel bolted T-stubs in tension[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 177: 109432. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109432.
- [15] YAPICI O, THEOFANOUS M, YUAN H X, et al. Numerical simulation and design of ferritic stainless steel bolted T-stubs in tension[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 198: 107555. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107555.
- [16] BEZERRA L M, BONILLA J, SILVA W A, et al. Experimental and numerical studies of bolted T-stub steel connection with different flange thicknesses connected to a rigid base [J]. Engineering Structures, 2020, 218: 110770. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110770.
- [17] 陈潘, 高飞, 万君如, 等. 高强钢T形件单向受拉力学性能试验及有限元研究[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(5): 40-50, 112. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.05.005.
- CHEN Pan, GAO Fei, WAN Junru, et al. Experimental and numerical study of the tensile behavior of high-strength steel T-stub[J]. Progress in Steel Building Structures, 2022, 24(5): 40-50, 112. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.05.005. (in Chinese)
- [18] ZHANG Y, LIU M, MA Q J, et al. Yield line patterns of T-stubs connected by thread-fixed one-side bolts under tension[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 166: 105932. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.105932.
- [19] ZHANG Y, WANG P J, LIU M, et al. Numerical studies on yield line patterns of thread-fixed one-side bolted endplate connection to square hollow section column under tension[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 173: 106262. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106262.
- [20] 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)
- [21] LIU L, CHEN H C, SUN L L, et al. Behavior of thread-fixed one-side bolts bolted T-stubs with arc-shaped flange to steel tube under tension [J]. Engineering Structures, 2023, 279: 115647. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.115647.
- [22] WULAN T Y, WANG P J, LI Y, et al. Numerical investigation on strength and failure modes of thread-fixed one-side bolted T-stubs under tension[J]. Engineering Structures, 2018, 169: 15-36. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.05.029.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [24] 王燕, 郑书朔, 柴文娟. 单边高强螺栓T型件连接节点试验研究及数值模拟[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2018, 51(增刊1): 78-85. DOI: 10.11784/tdxbz201804057.
- WANG Yan, JIA Shushuo, CHAI Wenjuan. Experimental study and numerical analysis of T-stub connections with single direction high strength bolts [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2018, 51 (Suppl. 1): 78-85. DOI: 10.11784/tdxbz201804057. (in Chinese)
- [25] 国家标准局. 紧固件 螺栓和螺钉通孔: GB/T 5277—1985[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
- National Bureau of Standards. Fasteners-Clearance Holes for Bolts and Screws: GB/T 5277—1985[S]. Beijing: Standards Press of China, 1985. (in Chinese)