

# 钢结构 T 型连接节点受力性能试验研究

刘秀丽, 王 燕, 李美红, 韩明岚

(青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘要:** 对不同构造形式的 10 个 T 型连接节点试件进行试验研究, 分析了构造变化对 T 型件连接承载能力及高强度螺栓受力性能的影响. 试验结果表明: 高强度螺栓拉力存在撬力现象, T 型连接表现出典型半刚性特性. T 型件翼缘厚度、螺栓直径及螺栓间距等构造因素对连接节点承载能力及高强度螺栓受力产生不同程度的影响, 设计中可根据具体情况选择最优的构造形式. 研究结果可供工程应用参考.

**关键词:** T 型件连接; 受力性能; 试验研究; 高强度螺栓拉力

**中图分类号:** TU393.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)06-0848-06

## Experimental study on the T-stub connections in steel structure

LIU Xiuli, WANG Yan, LI Meihong, HAN Minglan

(School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

**Abstract:** The paper presents the results of an experimental analysis devoted to the study of the mechanical behavior of high strength bolts and bearing capacity of T-stub connections. Then specimens are characterized by different values of thicknesses of T-flange, diameters of bolts and bolt arrangements, covering the whole range of practical design situation. The results show that the effect of prying force on bolt tension is found in tests, and the T-stub connection is a typical semi-rigid connection. The configuration parameters have different influence on the mechanical behavior of connections, and different constructional design of T-stub connections should be selected according to specific situation. The research conclusions can be used as reference for the engineering application.

**Key words:** T-stub connections; mechanical behavior; experimental study; high strength bolts tension

近年来, 地震带来的房屋倒塌灾害越来越受到人们的重视和关注, 随着经济发展和钢产量的大幅提升, 钢结构作为一种抗震性能优越的结构形式得到了工程界的青睐. 而焊接连接在抗震中表现出来的脆性破坏比较复杂, 难以较好的控制和避免, 高强度螺栓连接形式具有施工安装简单, 承载力高, 抗震性能优良等特点, 在工程中得到了较为广泛应用. T 型连接是以受拉高强度螺栓作为主要传力构件的一种节点形式(如图 1), 具有明显的半刚性特征, 在多高层框架及轻型门式刚架等结构形式中应用较为广泛<sup>[1-2]</sup>.

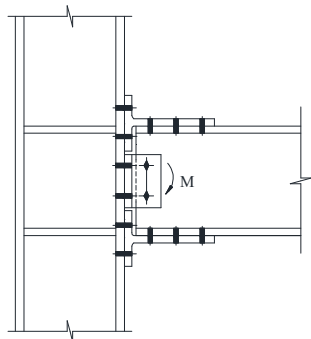


图 1 T 型件连接

Fig.1 T-stub connections

国外针对 T 型连接节点受力性能开展了大量试

验和理论研究, 提出了撬力计算模型及螺栓拉力计算模型<sup>[3]</sup>, 对 T 型连接翼缘刚度及螺栓刚度及其发展情况进行了分析<sup>[4]</sup>, 提出了评估 T 型连接塑性变形能力的理论模型<sup>[5-6]</sup>. 国内针对 T 型连接受拉螺栓设计方法仍在热点讨论, 作者<sup>[7-8]</sup>通过外伸端板连接节点有限元分析结果, 给出了外伸端板等效 T 型件连接撬力分布模型, 提出了修正的螺栓拉力计算方法. 陈绍蕃<sup>[9]</sup>通过理论分析, 提出了 T 型件连接理论模型撬力计算简化公式. 赵伟等<sup>[10]</sup>进行了 T 型连接试验研究, 重点研究了加劲肋对节点受力性能的影响. 为深入研究 T 型连接节点受力机理及螺栓受力性能, 本文进行了 10 个足尺 T 型连接试件试验研究, 研究了 T 型连接节点构造形式对承载力影响的敏感程度, 分析了高强度螺栓拉力的变化情况, 研究结果可为 T 型件连接构造设计及受拉高强度螺栓精细化分析提供参考.

## 1 试验概况

### 1.1 试验试件设计

本文设计了 6 组共 10 个足尺 T 型连接节点模型, 如图 2 所示. 每个 T 型连接采用两个剖分 T 型钢, 通过 4 个高强度螺栓连接而成. 采用剖分 T 型

钢可以有效避免焊缝带来的尺寸和角度误差及残余应力、变形等影响. 节点设计参数如表 1 所示, 螺栓间距满足现行钢结构设计规范及施工要求. 其中, T1 试件从剖分 T 型钢 TW 150×300×12×12 截取, T3 从剖分 T 型钢 TW 300×300×12×20 截取, 其余试件均从剖分 T 型钢 TW 300×300×12×17 截取. 图 2 所示的剖分 T 型钢材料特性为: 屈服强度 278.85 N/mm<sup>2</sup>, 抗拉强度 439.39 N/mm<sup>2</sup>(板厚≤16 mm); 屈服强度 266.54 N/mm<sup>2</sup>, 抗拉强度 435.15 N/mm<sup>2</sup>(板厚>16 mm). (材性试验如图 3 示)

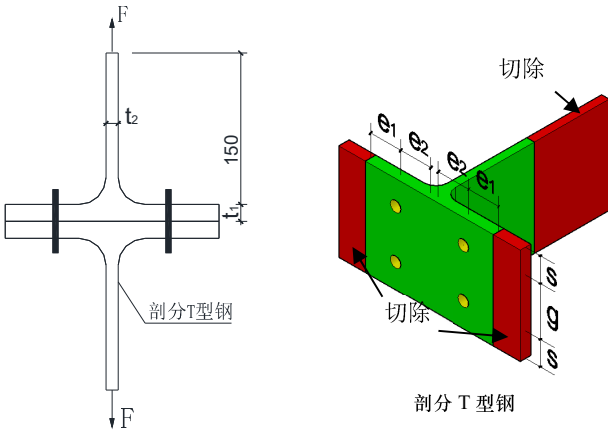


图 2 试验试件  
Fig.2 Test specimen

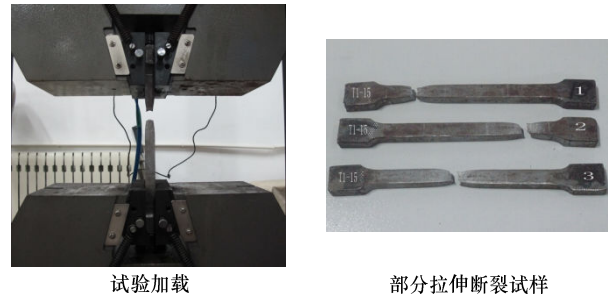


图 3 材性试验  
Fig.3 Material characteristic tests

表 1 试件参数  
Tab. 1 Parameters of test specimens

试件 编号	参数取值/mm							
	$t_1$	$t_2$	$d$	$e_1$	$e_2$	$g$	$s$	
T1	15	12	16	50	50	80	40	
T2	17	12	16	50	50	80	40	
T3	20	12	16	50	50	80	40	
T4	17	12	16	45	50	80	40	
T5	17	12	16	55	50	80	40	
T6	17	12	16	50	65	80	40	
T7	17	12	16	50	50	65	40	
T8	17	12	16	50	50	80	36	
T9	17	12	16	50	50	80	45	
T10	17	12	20	50	50	80	40	

注: 表中各符号详见图 2.

螺栓采用 10.9 级摩擦型高强度螺栓, 螺栓直径为 M16、M20. 根据《钢结构工程质量验收规范》

(GB50205-2001), 采用施工扭矩扳手对高强度螺栓施加预拉力. 直径为 M16、M20 的 10.9 级摩擦型高强度螺栓预拉力值分别为 100 kN、150 kN.

1.2 加载及测量

T 型连接试件采用 100 t 液压式万能材料试验机进行单向静力加载试验. T 型件腹板直接由试验机夹具夹紧施加拉力, 试验装置如图 4 所示. 外加荷载直接由液压式万能材料试验机采集, 为更好的观察试件变形及采集应力, 试验采用缓慢分级加载, 每 50 kN 采集一次数据.

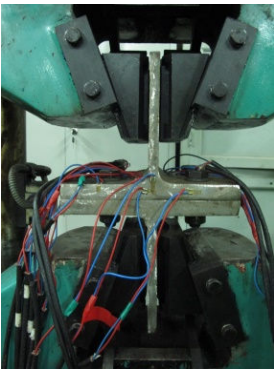


图 4 试验加载装置  
Fig.4 Loading device

为了研究高强度螺栓受力性能, 在 T 型连接对角的两个螺栓杆粘贴应变片. 应变片在螺栓杆两侧对称小槽中粘贴, 导线由螺栓头开孔引出, 如图 5 所示. 安装时让螺栓杆两侧应变片连线垂直于 T 型连接腹板平面. 应变片数据由静态应变测量系统 DH3815N 采集.

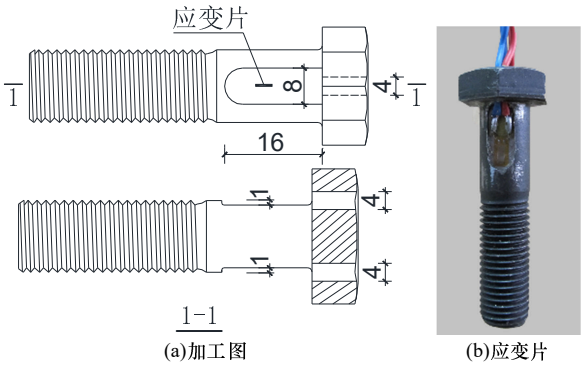


图 5 高强度螺栓示意图  
Fig.5 Details of high strength bolts

在保证试验目的前提下考虑试验条件, 当出现构件断裂(主要是螺栓可能发生)、应变片翘起失效、试件不能继续增加荷载的情况之一时即停止试验.

2 试验现象

试验中发现, 不同构造连接节点破坏过程类

似, 以 T2 试件为例描述试验过程. 外加荷载达到屈服荷载 435.7 kN 之前, 试件未出现肉眼可见的变形, T 型件翼缘之间保持贴合状态, 试件处在弹性阶段. 荷载超过 435.7 kN 之后, T 型件翼缘开始出现塑性变形, 随荷载增加塑性变形持续增加, 翼缘之间由于塑性变形呈现“张口”现象, 当荷载达到极限荷载 540.6 kN 时, 翼缘间最大间隙达到 6 mm. 试件不宜继续加载, 临近极限承载力状态.

图 6、表 2 对各试件最大间隙及螺栓极限应变进行比较分析.

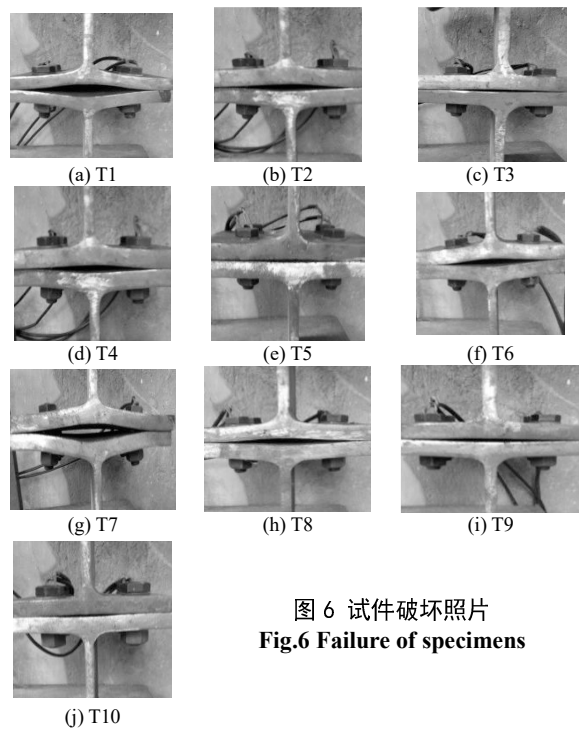


图 6 试件破坏照片  
Fig.6 Failure of specimens

表 2 试件最大间隙及螺栓极限应变  
Tab.2 Maximum gap of T-stub flanges and ultimate strain of bolts in test

试件	最大间隙/mm	螺栓极限应变/ $10^{-3}$
T1	8.5	123.99
T2	6.0	90.15
T3	4.0	43.36
T4	7.5	56.80
T5	3.5	130.39
T6	7.0	96.47
T7	12.0	125.79
T8	9.0	118.69
T9	5.0	101.45
T10	3.0	130.62

T1~T3 为 T 型件翼缘厚度逐渐增加的一组试件, 极限状态下最大间隙及螺栓应变均随之减小. 可见随着翼缘板厚度  $t$  增加, 其刚度增强, 有效阻止翼缘板弯曲变形, 螺栓应变随之减小. T4、T2、T5 为螺栓间距  $e_1$  逐渐增加的一组试件. 由于  $e_1$  增加翼缘宽度增大, 翼缘板刚度随之增强, 故最大间隙随之减小. 但当  $e_1$  由 45 mm 增至 50 mm 时, 最大间

隙变化不显著, 螺栓应变略有减小; 由 50 mm 增至 55 mm 时, 最大间隙减小比较明显, 螺栓应变略有增加. 可见  $e_1$  增加至 50 mm 时更加有效减小螺栓应变. T2、T6 为螺栓间距  $e_2$  逐渐增加的一组试件,  $e_2$  增大虽然翼缘宽度增加, 但由于螺栓位置向翼缘外侧偏移, 使得最大间隙增大, 螺栓应变增加. 可见增加  $e_2$  不能有效减小螺栓应变. T7、T2 为螺栓间距  $g$  增加的一组试件. 最大间隙略有增大, 不显著, 螺栓应变减小. 可见增加  $g$  可有效减小螺栓应变, 但对翼缘变形无明显抑制作用. T8、T2、T9 为螺栓间距  $s$  逐渐增加的一组试件,  $s$  由 36 mm 增至 40 mm 时, 最大间隙无明显变化, 螺栓应变减小,  $s$  增至 45 mm 时, 最大间隙减小, 螺栓应变略有增加. 可见  $s$  增至 45 mm 时不能有效减小螺栓应变. T2、T10 为螺栓直径增加的一组试件, 最大间隙明显减小, 螺栓应变增大. 由于螺栓直径增大, 预拉力增大, 翼缘板连接更加紧密, 故最大间隙减小. 可见, T 型件在外力的作用下翼缘出现弯曲变形产生撬力作用, 其影响程度随构造因素的变化而不同.

3 试验结果分析

3.1 试件承载力及变形

图 7 为试验试件荷载-位移曲线, 可以看出, 所有 T 型连接试件荷载-位移曲线规律基本一致.

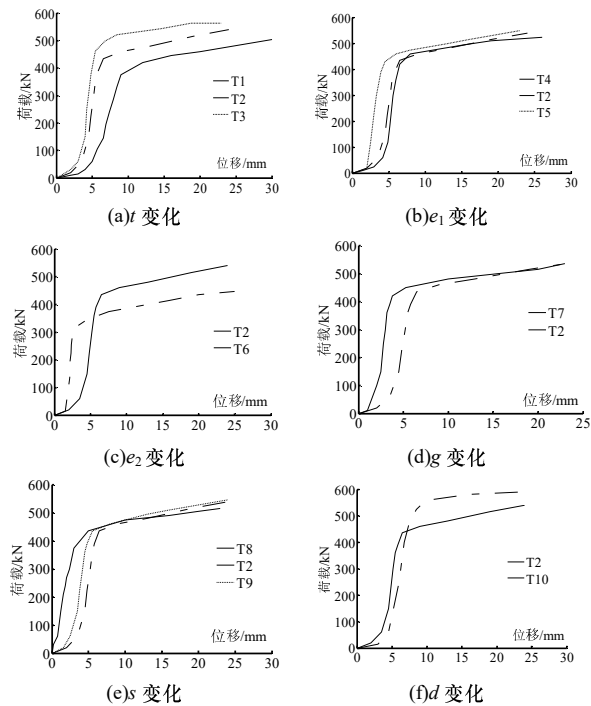


图 7 荷载-位移曲线

Fig.7 Load-displacement curve

加载初期, 试件与夹具之间的夹持力较小, 荷载-位移曲线有一小段滑移, 随荷载增加, 试件与夹

具间夹持力增大, 荷载-位移曲线基本为线性增加, 达到屈服荷载之后, 出现强化阶段, 位移随荷载增加速率加快, 直至达到连接极限荷载.

文献[11]大部分有限元模型与本文试验试件相同, 其有限元模型屈服荷载及极限荷载与试件试验结果比较见表 3.

将不同构造形式的 T 型连接试验试件荷载-位移曲线、承载力及变形进行比较分析可见, 随着荷载增大, 连接位移随之增大, T 型件翼缘发生弯曲变形, 表现出较强的塑性变形能力. 随着 T 型件翼

缘厚度  $t$  增加, 试件极限承载力明显增加, 且屈服位移明显减小. 螺栓间距  $e_1$  由 45 mm 增加至 50 mm 时承载力和屈服位移变化不明显, 当增至 55 mm 时, 极限承载力明显增加, 屈服位移明显减小. 螺栓间距  $e_2$  增加时极限承载力及屈服位移均明显增加. 螺栓间距  $g$  增加时极限承载力增加不如屈服位移增加显著. 螺栓间距  $s$  增加对极限承载力及屈服位移影响均不明显. 螺栓直径  $d$  增加可明显增加极限承载力, 对屈服位移略有增加的影响.

表 3 试件承载力及变形  
Tab.3 Bearing capacity and transformation of specimens

试件		屈服荷载/kN			极限荷载/kN			试验屈服	试验极限
本文	文献[11]	本文	文献[11]	误差	本文	文献[11]	误差/%	位移/mm	位移/mm
T1	---	375.3	---	---	505.3	---	---	9.1	30.2
T2	T1-1	435.7	448.20	2.87%	540.6	561.90	3.94	6.6	24.3
T3	T1-3	461.8	455.10	-1.45%	563.2	598.60	6.29	5.4	22.9
T4	E3-1	426.7	423.30	-0.80%	518.1	533.80	3.03	6.7	20.1
T5	E3-2	449.2	453.40	0.93%	552.0	582.50	5.53	5.46	23.8
T6	E4-1	314.9	349.40	10.96%	446.2	481.30	7.87	2.7	25.1
T7	G5-1	426.1	417.30	-2.07%	532.9	512.40	-3.85	4.1	22.4
T8	S6-1	421.3	425.60	1.02%	515.2	537.90	4.41	4.6	23.1
T9	S6-2	441.6	450.20	1.95%	546.9	573.05	4.78	6.8	24.1
T10	D2-1	490.2	476.04	-2.89%	591.6	625.60	5.75	9.0	24.5

表 3 试验试件与文献[11]有限元模型屈服荷载及极限荷载计算结果比较可见, 二者吻合良好, 除 T6 试件屈服荷载承载力误差略大于 10%, 其余试件误差均在 10%之内, 试验试件与有限元模型取得了较好的一致性.

3.2 T 型件参数变化影响分析

荷载-位移曲线弹性阶段均接近直线, 该直线段斜率可以反映 T 型连接承载力变化的快慢程度. 定义荷载-位移曲线直线段斜率为敏感系数  $k$ , 取直线段起点为 1 点 ( $F_1, \delta_1$ ), 终点为 2 点 ( $F_2, \delta_2$ ), 敏感系数  $k$  计算如下:

$$k = \Delta F / \Delta \delta = (F_2 - F_1) / (\delta_2 - \delta_1) \tag{1}$$

比较各构造形式变化对 T 型连接承载力影响程度.敏感系数  $k$  随各构造参数变化曲线如图 8 所示.

从图 8 可见, 翼缘厚度  $t$  增加, 敏感系数  $k$  增大, 但增加的幅度逐渐减小.  $e_1$  变化时, 敏感系数  $k$  变化不明显,  $e_2$  增加, 敏感系数  $k$  略有增加,  $g$  增加, 敏感系数  $k$  略有下降.  $s$  增加, 敏感系数  $k$  略有增加, 增加幅度逐渐减小.  $d$  增加, 敏感系数  $k$  下降. 可见, 翼缘厚度  $t$  增加时敏感系数增大最明显, 即其对 T 型连接承载力影响最快, 但增加幅度逐渐减小. 螺栓间距变化对 T 型连接承载力影响较慢. 螺栓直径  $d$  增加时端板相对变弱, 承载力增加速率减慢, 但

由于螺栓直径增大, 连接极限弯矩增大.

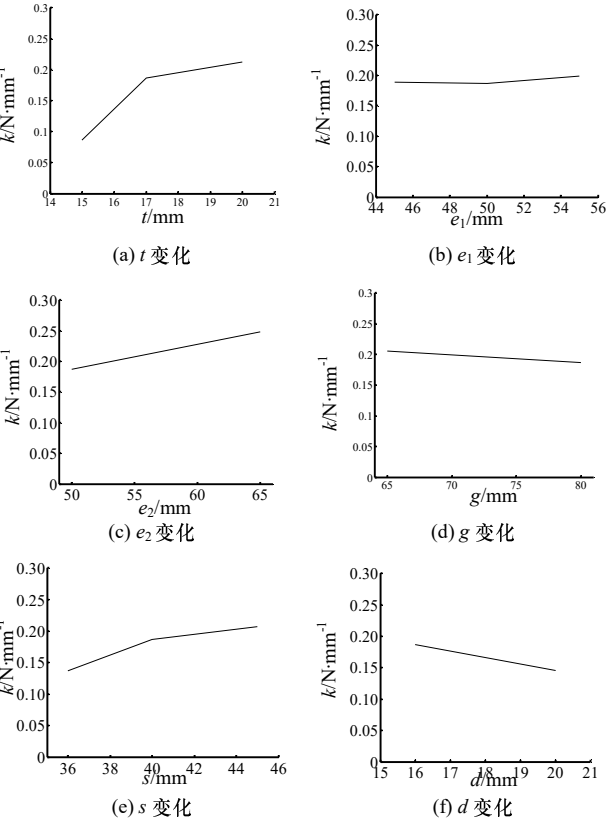


图 8 敏感系数  $k$  变化曲线  
Fig.8 Curve of coefficient  $k$

3.3 高强度螺栓拉力测试及分析

高强度螺栓所受到的拉力  $P_t$ (为外加荷载产生

的螺栓拉力  $N_t$  和撬力  $Q$  之和)是 T 型连接中最重要  
的受力性能,通过高强度螺栓杆应变片测量平均应

变  $\bar{\varepsilon}$  计算高强度螺栓拉力  $P_f$  如表 4 及图 9 所示。

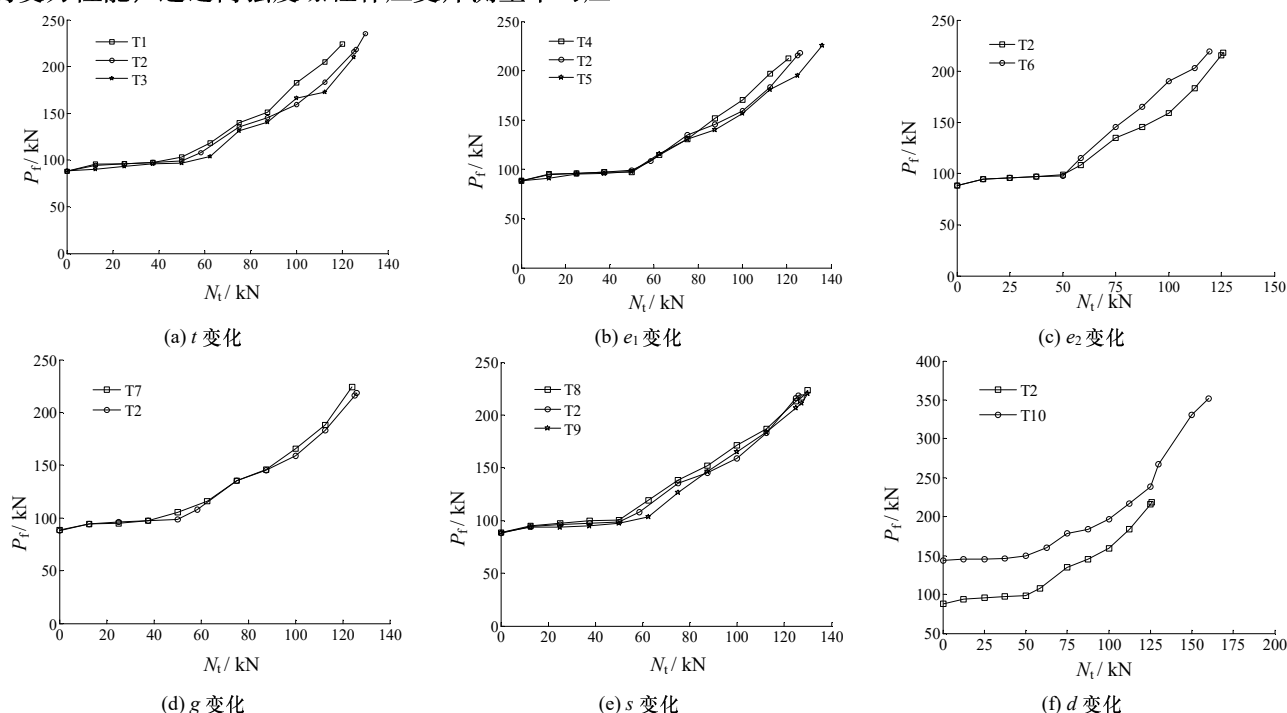


图9 高强度螺栓拉力

Fig.9 Tensile force of high strength bolts

表4 高强度螺栓平均应变及拉力  
Tab.4 Average strain and tensile force  
of high strength bolts

试件	外加荷载 $N_t=50\text{kN}$		外加荷载最大值	
	$\bar{\varepsilon} / 10^{-3}$	$P_f / \text{kN}$	$\bar{\varepsilon} / 10^{-3}$	$P_f / \text{kN}$
T1	2.49	103.28	123.99	224.19
T2	2.38	98.75	90.15	218.30
T3	2.34	96.91	43.36	210.16
T4	2.39	98.89	56.80	212.50
T5	2.38	98.73	130.39	225.30
T6	2.36	97.75	96.47	219.40
T7	2.54	105.29	125.79	224.50
T8	2.43	100.63	118.69	223.27
T9	2.36	97.63	101.45	220.27
T10	2.32	150.00	130.62	352.10

从表4和图9可以看出:

(1) 高强度螺栓拉力  $P_f$  曲线变化规律基本一致,加载初期基本保持预拉力不变,当外力达到一定限值时翼缘板出现分离现象,曲线出现转折拐点,高强度螺栓拉力开始逐步上升,直至连接破坏。

(2) 图(a)可见,随着翼缘板厚度  $t$  增加,高强度螺栓拉力逐渐减小,较厚翼缘板刚度较大,可有效阻止翼缘板弯曲变形,从而减小杠杆作用产生的撬力影响。从曲线拐点及临近破坏极限状态的高强度螺栓拉力比较可见,翼缘板厚度由 15 mm 增至 17 mm 时,高强度螺栓拉力减小更加显著,翼缘板厚

度由 17 mm 增至 20 mm 时,高强度螺栓拉力减小趋于平缓。可见,翼缘板厚度越大,其减小高强度螺栓拉力的幅度减弱。

(3) 从图(b)、(c)可见,随着螺栓间距  $e_1$ 、 $e_2$  增加,在曲线拐点处高强度螺栓拉力变化均不明显。在临近破坏状态, $e_1$  增加,高强度螺栓拉力随之减小。 $e_2$  增加,高强度螺栓拉力随之增大。可见,考虑经济效益和螺栓受力有利的要求,宜采用最小构造  $e_2$ ,可适当增大  $e_1$ 。

(4) 从图(d)、(e)可见,随螺栓间距  $g$  增加,在曲线拐点及临近破坏状态,高强度螺栓拉力均出现下降。当螺栓间距  $s$  增加时,在曲线拐点处高强度螺栓拉力下降,在临近破坏状态时, $s$  在 40 mm 时高强度螺栓拉力最大,减小或增加  $s$  均可降低高强度螺栓拉力。

(5) 从图(f)可见,螺栓直径  $d$  增大时,预拉力增加,在加载初期,高强度螺栓拉力均保持预拉力不变。直至曲线拐点处,两试件曲线几乎接近平行。可见在翼缘板出现分离的极限状态以前,撬力影响几乎相同,采用大直径未取得明显减小撬力的作用。临近破坏极限状态时,高强度螺栓拉力趋近相等,此时小直径高强度螺栓拉力增加幅度更加显著。

综上所述,翼缘厚度  $t$  是影响高强度螺栓拉力最显著的构造因素,但翼缘板过厚时高强度螺栓减小幅度较小. 螺栓间距  $e_1$  增加亦可较明显减小高强度螺栓拉力,螺栓间距  $g, s$  变化对高强度螺栓拉力影响甚微,螺栓间距  $e_2$  增加反而增大高强度螺栓拉力. 螺栓直径  $d$  增大时由于初期高强度螺栓预拉力值较大,故高强度螺栓受力比较大,在临近破坏状态,小直径高强度螺栓拉力增加幅度更大.

## 4 结论

(1) 在外力作用下, T 型件翼缘发生弯曲变形,表现出较强的塑性变形能力.

(2) T 型连接构造形式变化对节点承载力产生不同程度影响,其中翼缘厚度  $t$  对节点承载力影响最为敏感,但厚度越大影响幅度越小. 高强度螺栓间距对承载力影响不显著. 高强度螺栓直径  $d$  增加使翼缘板相对减弱,使得敏感系数减小.

(3) T 型连接构造形式变化对高强度螺栓拉力产生不同程度影响. 翼缘厚度影响最显著,随翼缘厚度增加高强度螺栓拉力下降,下降幅度逐渐减小. 间距  $e_1$  增加可较明显减小高强度螺栓拉力,间距  $e_2$  增加反而增大高强度螺栓拉力,间距  $g, s$  变化对高强度螺栓拉力影响甚微. 直径增加在临近破坏时可降低高强度螺栓拉力增加幅度.

## 参考文献 References

- [1] 李帼昌,孙卿,郭晓龙,等. T 型钢连接的方钢管柱-H 型钢梁半刚性节点滞回性能的有限元分析[J]. 工程力学, 2014, 31(S1): 32-35.  
LI Guochang, SUN Qing, GUO Xiaolong, et al. Finite element analysis on hysteretic performance of a T-Stub connected semi-rigid joint between rectangular steel tube column and H-shaped steel beam[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31 (S1): 32-35.
- [2] 李玉顺,蒋天元,单炜,等. 钢-竹组合梁柱边节点拟静力试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 241-248.  
LI Yushun, JIANG Tianyuan, SHAN wei, et al. Quasi-Static test on steel-bamboo composite beam-column exterior joints [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 241-248.
- [3] 楼国彪,李国强,雷青. 钢结构高强度螺栓端板连接研究现状(I) [J]. 建筑钢结构进展, 2006, 8(2): 8-21.  
LOU Guobiao, LI Guoqiang, LEI Qing. Recent developments in the behavior and design of high-strength bolted endplate connections (I) [J]. Progress in Steel Building Structures, 2006, 8(2): 8-21.
- [4] JAMES A, Swanson, ROBERTO T. Leon. Stiffness modeling of bolted T-stub connection components[J]. Journal of structural engineering, 2001, 127(5): 498-505.
- [5] PILUSO V, Faella C, Rizzano G. Ultimate Behavior of Bolted T-Stubs. I: Model Validation [J]. Journal of Structural of Structural Engineering, ASCE, 2001, 127(6): 686-693.
- [6] PILUSO V, FAELLA C, RIZZANO G. Ultimate Behavior of Bolted T-Stubs. II: Model Validation[J]. Journal of Structural of Structural Engineering, ASCE, 2001, 127(6): 694-704.
- [7] 刘秀丽,王燕. 外伸端板高强度螺栓抗拉连接设计方法研究[J]. 建筑钢结构进展, 2013, 15(1): 29-36.  
LIU Xiuli, WANG Yan. Study on the design method of high strength bolts of extended end-plate tensile connections[J]. Progress in Steel Building Structures, 2013, 15(1): 29-36.
- [8] 刘秀丽,王燕. 外伸端板连接节点撬力分布研究[J]. 建筑钢结构进展, 2014, 16(4): 29-38.  
LIU Xiuli, WANG Yan. Analysis on prying force distribution of extended end plate with bolted connections[J]. Progress in Steel Building Structures, 2014, 16(4): 29-38.
- [9] 陈绍蕃. 论高强度螺栓连接的分类和抗拉连接的计算[J]. 建筑钢结构进展, 2014, 16(3): 1-6.  
CHEN Shaofan. On the classification of high-strength bolt connections and the calculation of connections subjected to tension[J]. Progress in Steel Building Structures, 2014, 16(3): 1-6.
- [10] 赵伟,童根树. 外伸端板加劲肋试验和有限元研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(8): 22-30.  
ZHAO wei, TONG genshu. Test and finite element analysis of end-plate stiffeners for extended end-plate connections[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(8): 22-30.
- [11] 李美红,王燕,刘秀丽. 钢结构梁柱 T 型连接节点的力学性能分析[J]. 钢结构, 2015, 30(4): 54-60.  
LI meihong, WANG yan, LIU xiuli. Finite element analysis on mechanical properties of beam-to-column T connections of steel structure[J]. Steel Construction, 2015, 30(4): 54-60.

(编辑 吴海西)