

# 中美欧高强度螺栓外伸端板连接设计方法比较

刘秀丽<sup>1,2</sup>, 王 燕<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033)

**摘 要:** 为了深入研究外伸端板连接设计方法, 本文针对中美欧规范外伸端板连接设计方法进行了比较分析, 总结了中美欧规范外伸端板连接设计方法异同. 研究表明, 中美欧规范均采用 T 型件设计理论对外伸端板连接进行设计, 我国《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ82-2011) 和美国《建筑钢结构荷载抗力分项系数设计规范》(LRFD) 在螺栓连接技术规程中针对外伸端板的连接计算中均引入了破坏模式系数  $\alpha'$  以考虑 T 型件模型的三种破坏形式, 欧洲规范 EC3 则直接按 T 型件的三种破坏形式进行计算. 我国《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ82-2011) 针对高强度螺栓外伸端板连接节点首次引入了撬力设计方法, 设计方法更加符合工程实际.

**关键词:** 高强度螺栓; 外伸端板连接; T 型件; 撬力

**中图分类号:** O34

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2012)01-0041-09

高强度螺栓端板连接是钢结构常用的连接形式, 它是一种典型的半刚性连接形式<sup>[1-5]</sup>. 高强度螺栓外伸端板连接形式通常采用 T 型件模型设计理论进行端板和螺栓设计. T 型件连接在外力作用下, 高强度螺栓承受拉力, T 型件连接受力后由于 T 型件翼缘发生弯曲变形而形成杠杆作用(即撬力), 撬力增加了螺栓拉力并对连接节点的强度和性能不利, 设计中应考虑撬力影响, 根据螺栓和 T 型件翼缘相对强弱关系, T 型件连接可能发生三种极限承载能力极限状态, 不同的极限状态撬力影响不同.

欧洲规范 EC3<sup>[6]</sup> 中对高强度螺栓端板连接采用的是等效 T 型件设计方法, 依据塑性铰线分布情况选择 T 型件等效长度, 根据 T 型件理论设计端板和撬力计算. 美国《建筑钢结构荷载抗力分项系数设计规范》(LRFD)<sup>[7]</sup> 直接将高强螺栓端板连接简化为 T 型件模型进行设计, 并分别给出考虑撬力和不考虑撬力的端板设计公式. 我国《钢结构设计规范》(GB50017-2003)<sup>[8]</sup> 为简化设计过程, 规定受拉高强度螺栓承载力设计值取为  $0.8P$  ( $P$  为预拉力). 其原因是根据相关实验结果证明<sup>[9]</sup>, 当外加拉力过大时螺栓将发生松弛现象, 导致螺栓松弛现象的原因与受拉节点连接在实验中产生的撬力有关. 我国《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS102:2002)<sup>[10]</sup> 中采用平面端板塑性分析方法进行端板设计, 没有明确提出撬力的计算. 我国《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ82-2011)<sup>[11]</sup> 首次引入了撬力的设计方法, 根据 T 型件的设计理论模型对端板连接节点进行设计, 设计方法更加符合工程实际.

## 1 T 型件模型的三种破坏形式

在工程设计中高强度螺栓端板连接通常简化为 T 型件, 如图 1 所示<sup>[12-13]</sup>. T 型件模型有三种可能的破坏形式, 破坏形式取决于螺栓和 T 型件翼缘之间的相对强弱关系. 第一种破坏形式出现在薄翼缘和螺栓相对较强的 T 型件连接, 属于薄翼缘破坏形式, 到达极限状态时在 T 型件翼缘螺栓孔处和 T 型件翼缘根部达到屈服弯矩而破坏, 产生撬力. 如图 2(a). 第二种破坏形式出现在中等厚度翼缘而螺栓强度适中的 T 型件连接, 属于中等厚度翼缘破坏形式, 破坏时螺栓达到极限抗拉强度而破坏, 在 T 型件翼缘根部达到屈服弯矩, 产生撬力, 如图 2(b). 第三种破坏形式出现在厚翼缘而螺栓相对较弱的 T 型件连接, 属于厚翼缘破坏形式. 螺栓达到抗拉极限状态而拉断, T 型件翼缘仍处在弹性范围, 几乎不发生弯曲变形, 此时撬力可忽略不计, 如图 2(c).

收稿日期: 2011-06-24 修改稿日期: 2011-12-12

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(Y2002F15); 山东省教育厅基金资助项目(J05F02)

作者简介: 刘秀丽(1978), 女, 湖北黄冈人, 讲师, 博士生, 主要从事钢结构方面的研究.

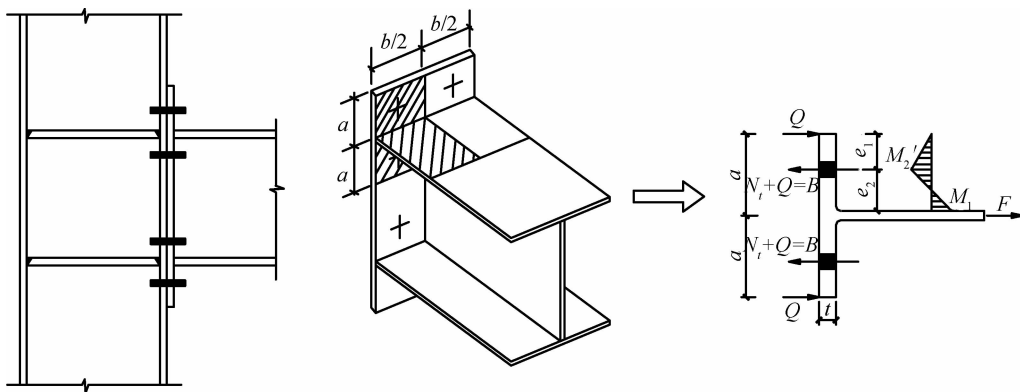


图1 外伸端板连接简化为T型件模型

Fig. 1 Bolted end-plate connection simplified to T-sub

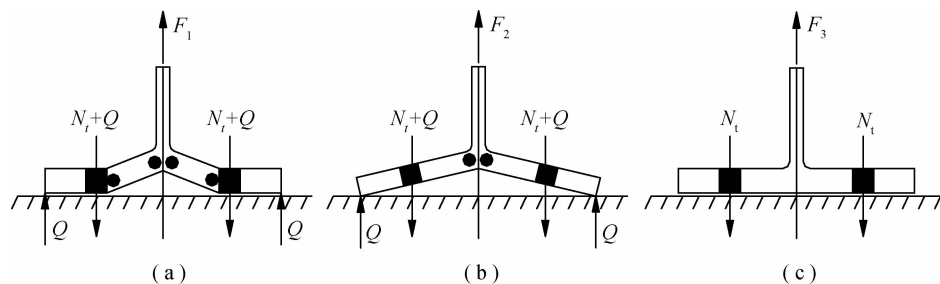


图2 T型件模型破坏形式

Fig. 2 Failure modes of T-stub

第一种破坏中产生的撬力最大,破坏形式表现为T型件翼缘屈服破坏,是T型件翼缘极限最小厚度设计的破坏形式.第三种破坏产生的撬力最小,可以忽略不计,T型件翼缘相对较厚,用于设计过于保守.第二种破坏是介于前两种破坏之间的一种临界状态,产生的撬力也介于二者之间,螺栓破坏和端板屈服破坏同时发生,按这种破坏计算的端板厚度介于前两种设计之间.

## 2 中美欧设计方法

### 2.1 美国《建筑钢结构荷载抗力分项系数设计规范》(LRFD)设计方法

美国规范将高强螺栓端板连接简化为T型件模型,T型件翼缘宽度取端板宽度的一半,如图3所示.考虑螺栓力发生在孔壁处而非螺栓中心,将螺栓间距 $e_1, e_2$ 调整为 $e'_1, e'_2$ .

当不考虑撬力影响时,即为厚翼缘破坏形式,端板厚度为 $t_c$ ,考虑撬力影响时,包括中等厚度翼缘破坏形式和薄翼缘破坏形式,端板厚度为 $t_{req}$ .计算式如下:

$$t_c = \sqrt{\frac{4N_t e'_2}{p\phi f_y}}; t_{req} = \sqrt{\frac{4N_t e'_2}{p\phi f_y(1+\delta\alpha')}} \quad (1)$$

$$\text{撬力计算式: } Q = N_t \left[ \delta\alpha\rho \left( \frac{t}{t_c} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$\text{参数计算: } \beta = \frac{1}{\rho} \left( \frac{N_t}{N_t} - 1 \right) < 1; \alpha' = \frac{1}{\delta} \left( \frac{\beta}{1-\beta} \right) (\beta < 1.0 \text{ 时}, \alpha' = 1.0; \beta < 1.0 \text{ 时}, \alpha' \leq 1.0); \alpha = \frac{1}{\delta} \left[ \frac{N_t}{N_t} \left( \frac{t_c}{t} \right)^2 - 1 \right] < 0; e'_1 = e_1 + d/2, e'_2 = e_2 - d/2, \rho = e'_2 / e'_1, \delta = 1 - d_0/p.$$

其中,钢材强度设计值为 $\phi f_y$ , $\phi$ 为钢材屈服强度折减系数,通常取 $\phi = 0.9$ .一个高强度螺栓的抗拉

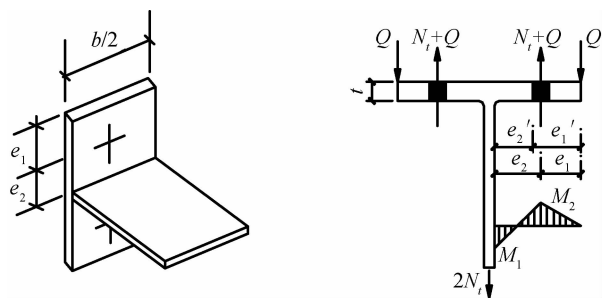


图3 美国规范计算模型

Fig. 3 Calculation model of LRFD of U. S. A.

承载力设计值  $N_t^b = \phi R_n = 0.75 f_y^b A$ ;  $p$  为一个螺栓承担 T 型件翼缘宽度,  $p = \frac{b}{2}$ .

## 2.2 欧洲规范 EC3 设计方法

### 2.2.1 T 型件计算模型

在欧洲规范 EC3 中,采用等效 T 型件的设计方法进行设计.将高强度螺栓端板连接节点简化成等效 T 型件,T 型件宽度取为有效长度  $l_{ef}$ ,如图 4 所示.

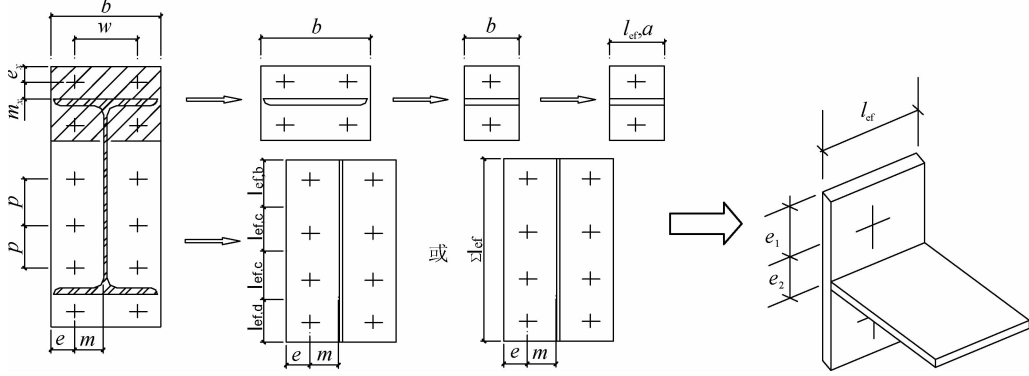


图 4 欧洲规范 EC3 的等效 T 型件简化模型

Fig. 4 Simplified model of equivalent T-stub in EC3 in Europe

等效 T 形件的有效长度  $l_{ef}$  按螺栓排的具体位置和塑性铰线分布模式确定.具体取值方法详见文献[14].

### 2.2.2 破坏形式

等效 T 型件可能发生三种破坏形式如图 5(a)(b)(c)所示.

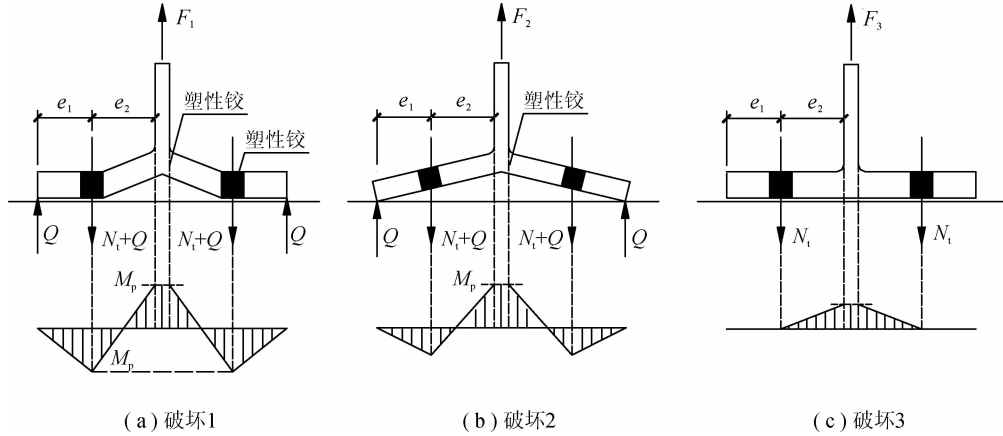


图 5 等效 T 型件的三种破坏机制

Fig. 5 Three failure modes of equivalent T-stub

#### (1) 第一种破坏形式

对于图 5(a)所示的第一种破坏形式,T 型件翼缘的根部和螺栓位置处同时达到塑性弯矩,且螺栓处发生塑性弯矩时不考虑净截面的影响,螺栓处的塑性弯矩与翼缘根部塑性弯矩大小相等.属于薄翼缘破坏形式.建立平衡方程:

$$(N_t + Q)e_2 - Q(e_1 + e_2) = M_p; Q \cdot e_1 = M_p; M_p = \frac{1}{4} \cdot \frac{l_{ef}}{2} t^2 \frac{f_y}{\gamma_{mo}} \quad (3)$$

联立上式可推导出端板厚度设计公式及撬力计算式为:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2N_t e_2}{l_{ef} \frac{f_y}{\gamma_{mo}}}}; Q_1 = \frac{N_t e_2}{2e_1} \quad (4)$$

## (2) 第二种破坏形式

对于图 5(b)所示的第二种破坏形式,认为 T 型件翼缘根部端板达到塑性弯矩,且螺栓破坏,属于中等厚度翼缘破坏形式.根据力的平衡关系,可得:

$$(N_t + Q)e_2 - Q(e_1 + e_2) = M_p; N_t + Q = N_t^b \quad (5)$$

可推导出端板厚度设计公式及撬力计算式为:

$$t_2 = \sqrt{\frac{4N_t(e_1 + e_2) - 4N_t^b e_1}{l_{ef} \frac{f_y}{\gamma_{mo}}}}; Q_2 = N_t^b - N_t \quad (6)$$

## (3) 第三种破坏形式

对于图 5(c)所示的第三种破坏形式,端板不发生塑性变形,螺栓破坏.此时撬力为零,属于厚翼缘破坏形式.建立平衡方程:

$$N_t e_2 = M_p; N_t = N_t^b \quad (7)$$

可推导出端板厚度设计公式为:

$$t_3 = \sqrt{\frac{4N_t^b e_2}{l_{ef} \frac{f_y}{\gamma_{mo}}}} \quad (8)$$

上列计算式中,T 型件的翼缘宽度为根据端板塑性铰线分布而取得的有效长度  $l_{ef}$ ,  $\frac{f_y}{\gamma_{mo}}$  为端板钢材设计强度值  $f$ ,  $\gamma_{mo}$  为抗力分项系数,通常取值为  $\gamma_{mo} = 1.15$ .

## 2.3 我国《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ82—2011)设计方法

我国高强度螺栓端板连接设计方法是在荷兰代尔夫特理工大学 Struik, J. H. A. 和 de Back, J.<sup>[15]</sup> 提出的设计理论上修订得来的.采用 T 型件模型设计理论,引入撬力影响进行端板和螺栓设计. T 型件模型及受力分析如图 1 所示,可得端板和撬力计算如下<sup>[2]</sup>:

当不考虑撬力影响时,属于厚翼缘破坏形式,端板厚度为  $t_c$ ,当考虑撬力影响时,包括中等厚度翼缘破坏形式和薄翼缘破坏形式,端板厚度为  $t$ .计算式如下:

$$t_c = \sqrt{\frac{8N_t^b e_2}{b \frac{f_y}{\gamma_o}}} \quad (9)$$

撬力计算公式为:

$$Q = \left[ \alpha \cdot \delta \cdot \rho \left( \frac{t}{t_c} \right)^2 \right] \cdot N_t^b \quad (10)$$

式中,各系数计算详见文献[2].

计算中直接将高强螺栓端板连接简化为 T 型件,取 T 型件翼缘宽度为端板宽度的一半  $\frac{b}{2}$ ,端板厚度计算中材料钢材的设计强度,即  $\frac{f_y}{\gamma_o}$ ,通常抗力分项系数  $\gamma_o = 1.1$ .

## 3 中美欧高强螺栓端板连接设计方法比较

欧洲规范按 T 型件三种破坏形式分别进行计算.我国的高强螺栓端板连接设计方法分别按考虑和不考虑撬力设计端板厚度,并给出撬力计算公式,计算理论与美国规范基本一致.

端板厚度计算公式中直接引入了系数  $\alpha'$  和  $\delta$ ,间接引入了系数  $\alpha$  和  $\beta$ .其中: $\alpha'$  为破坏模式系数, $\beta$  为高强螺栓承载力影响系数; $\alpha$  为端板塑性变形系数; $\delta$  为螺栓净截面影响系数.

由 T 型件三种破坏形式对应的翼缘和螺栓相对强弱关系可见,第一种破坏发生在翼缘相对较薄而螺栓相对较强的 T 型件连接;第二种破坏发生在中等翼缘和螺栓强度适中的 T 型件连接;第三种破坏发生在厚翼缘而螺栓相对较弱的 T 型件连接.高强度螺栓承载力影响系数  $\beta$  可以表征 T 型件三种破坏形式下的螺栓相对强弱.端板塑性变形系数  $\alpha$  表征 T 型件三种破坏形式下的翼缘相对强弱.破坏模式系数  $\alpha'$  表征 T 型件三种破坏形式,其取值与系数  $\alpha$  及系数  $\beta$  有对应关系.

根据公式  $\beta = \frac{1}{\rho} (\frac{N_t^b}{N_t} - 1) < 1$  可得螺栓承载力影响系数  $\beta$  与 T 型件三种破坏形式对应的关系曲线, 如图 6 所示. 可以看出, 当  $\beta < 1.0$  时, 可得:  $\frac{N_t^b}{N_t} < \frac{(e_1 + e_2)}{e_1} > 1$ , 且一般情况下,  $e_2 \approx e_1$ , 故表明螺栓拉力  $N_t$  远小于螺栓抗拉承载力  $N_t^b$ , 此时螺栓未发生破坏. 表示 T 型件螺栓相对较强, 属于第一种破坏形式的 T 型件模型; 当  $0 < \beta < 1.0$  时, 螺栓拉力  $N_t$  接近螺栓极限承载力  $N_t^b$ , 但未发生破坏. 表示 T 型件螺栓强度适中, 属于第二种破坏形式的 T 型件模型; 当  $\beta = 0$  时, 则  $N_t = N_t^b$ , 即螺栓发生破坏. 表示 T 型件模型螺栓相对较弱, 属于第三种破坏的 T 型件模型.

根据公式  $\alpha' = \frac{1}{\delta} (\frac{\beta}{1-\beta})$  ( $\beta < 1.0$  时,  $\alpha' = 1.0$ ;  $\beta < 1.0$  时,  $\alpha' \leq 1.0$ ;) 可得 T 型件模型的破坏模式系数  $\alpha'$  与 T 型件三种破坏形式对应关系曲线, 如图 7 所示. 可以看出, 当  $\alpha' = 1.0$  时,  $\beta < 1.0$ ,  $\alpha = 1.0$ , 表示 T 型件螺栓相对较强, 为薄翼缘, 属于第一种破坏形式的 T 型件模型; 当  $0 < \alpha' < 1.0$  时,  $0 < \beta < 1.0$ ,  $0 < \alpha < 1.0$ , 表示 T 型件螺栓强度适中, 为中等翼缘厚度, 属于第二种破坏形式的 T 型件模型; 当  $\alpha' = 0$  时,  $\beta = 0$ ,  $\alpha = 0$ , 表示 T 型件螺栓相对较弱, 为厚翼缘, 属于第三种破坏形式的 T 型件模型.

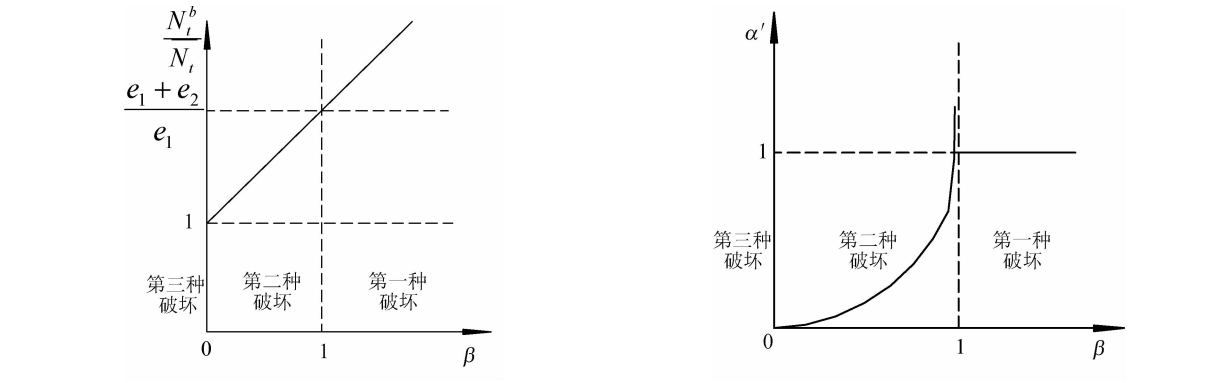


图 6 系数  $\beta$  与 T 型件三种破坏形式关系曲线

图 7 系数  $\alpha'$  与 T 型件三种破坏形式关系曲线

Fig. 6 Curve of  $\beta$  and three modes of T-stub

Fig. 7 Curve of  $\alpha'$  and three modes of T-stub

可见系数  $\alpha'$  和  $\beta$  的取值与 T 型件三种破坏形式有对应关系, 可以通过系数的取值判断 T 型件发生的破坏形式, 不需按 T 型件三种破坏形式逐一试算的方式进行设计, 从而简化设计过程.

表 1 中美欧规范 T 型件连接计算方法比较

Tab. 1 Comparison of design methods of T-stub in JGJ82-2011, LRFD and EC3

T 型件设计方法		T 型件破坏形式		
		第一种破坏	第二种破坏	第三种破坏
文献[5]	端板厚度	$\sqrt{\frac{2N_t e_2}{\left(l_{ef} \frac{f_y}{\gamma_{mo}}\right)}}$	$\sqrt{\frac{[4N_t(e_1 + e_2) - 4N_t^b e_1]}{\left(l_{ef} \frac{f_y}{\gamma_{mo}}\right)}}$	$\sqrt{\frac{4N_t^b e_2}{\left(l_{ef} \frac{f_y}{\gamma_{mo}}\right)}}$
	撬力	$\frac{N_t e_2}{(2e_1)}$	$N_t^b - N_t$	无撬力
文献[6]	端板厚度		$\sqrt{\frac{4N_t^b e'_2}{[p\phi f_y (1 + \delta\alpha')]}}$	$\sqrt{\frac{4N_t^b e'_2}{p\phi f_y}}$
	撬力		$N_t^b [\delta\alpha\rho(\frac{t}{t_c})^2]$	无撬力
文献[10]	端板厚度		$\sqrt{\frac{8N_t e_2}{\left[\frac{bf_y}{\gamma_0 (1 + \alpha'\delta)}\right]}}$	$\sqrt{\frac{8N_t^b e_2}{\left(b \frac{f_y}{\gamma_0}\right)}}$
	撬力		$[\alpha \cdot \delta \cdot \rho(\frac{t}{t_c})^2] \cdot N_t^b$	无撬力

由表 1 可见,中美欧规范虽然形式不同,但都包括了 T 型件三种破坏形式,中美规范通过引入 T 型件模型的破坏模式系数  $\alpha'$  判断 T 型件模型的破坏形式,而欧洲规范则直接按三种破坏形式分别计算.端板厚度和撬力计算公式虽然形式上有一定差异,但基本设计理论一致,只在 T 型件模型的选取、钢材设计强度值、螺栓抗拉承载力、T 型件翼缘螺栓处净截面影响等方面存在一些差异,如表 2 所示.

表 2 中美欧规范 T 型件连接设计方法差异

Tab. 3 Difference of design methods of T-stub in JGJ82-2011, LRFD and EC3

设计参数		文献[5]	文献[6]	文献[10]
模型参数	翼缘宽度	$l_{ef}$	$p$	$\frac{b}{2}$
	边距	$e_1$	$e_1 + \frac{d}{2}$	$e_1$
	中距	$e_2$	$e_2 - \frac{d}{2}$	$e_2$
钢材设计强度		$\frac{f_y}{\gamma_{mo}}$	$\phi f_y$	$\frac{f_y}{\gamma_0}$
螺栓抗拉承载力设计值 $N_t^b$		$\frac{0.9 f_{tb} A_s}{\gamma_{mb}}$	$0.75 f_t^b A$	$0.8 P$
翼缘螺栓净截面影响系数		$\delta=1.0$	$0 \leq \delta \leq 1.0$	$0 \leq \delta \leq 1.0$

4 算 例

梁柱外伸端板连接构造如图 8 所示,钢材 Q235,节点内力:弯矩  $M=166\text{ kNm}$ ;轴力  $N=32\text{ kN}$ ;剪力  $V=51\text{ kN}$ .算例(1)采用 10M24,8.8 级高强度摩擦型螺栓.算例(2)采用 10M20,10.9 级高强度摩擦型螺栓.算例(3)采用 10M24,10.9 级高强度摩擦型螺栓.

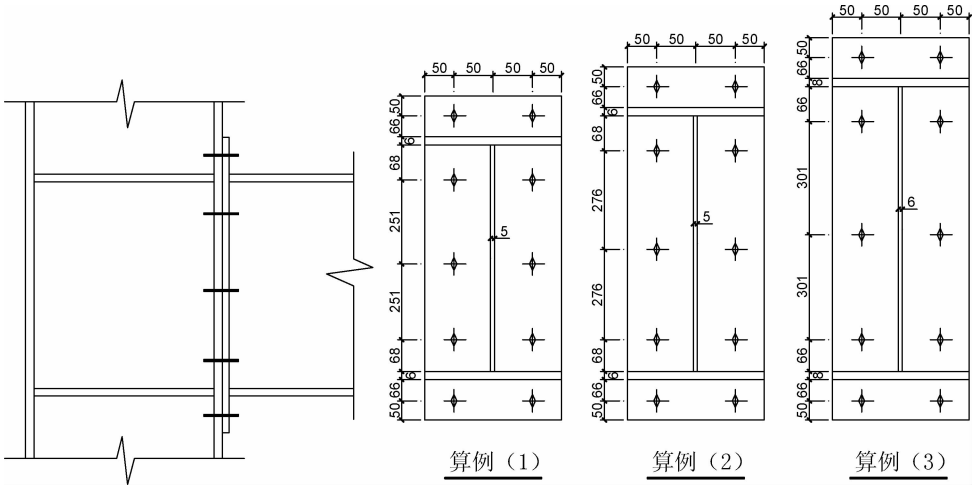


图 8 梁柱连接节点构造图

Fig. 8 Configuration of beam-column connections

分别对三种不同梁高的外伸端板连接构造分别按中美欧高强度螺栓连接技术规程端板连接设计方法进行端板厚度及撬力计算.计算结果见表 3、图 9~图 11 所示.

从表 7 和图 9~图 11 可以看出,按厚翼缘破坏形式(即第三种破坏形式)设计时,中美欧规范均不考虑撬力,撬力值为零.设计端板厚度均较大,我国 JGJ82-2011 规程设计的端板厚度略大,美国 LRFD 规范和欧洲 EC3 规范设计端板厚度接近相等.按薄翼缘破坏形式(即第一种破坏形式)设计时,中美欧设计端板厚度基本接近,我国 JGJ82-2011 规程计算撬力值介于美国 LRFD 规范和欧洲 EC3 规范之间.可见,我国 JGJ82-2011 规程设计的端板厚度与美国规范和欧洲规范基本一致,当不考虑撬力时设计的端板偏于保守,撬力计算值介于美国规范和欧洲规范之间.中美欧规范设计理论一致,设计差异主要来

源于表 2 所示的因素引起.

表 3 中美欧规范端板厚度及撬力计算结果比较

Tab. 3 Comparison of calculation results of thickness of end-plate and prying force in JGJ82-2011, LRFD and EC3					
算 例	设计值	破坏形式	文献[10]	文献[6]	文献[5]
算例(1)	端板厚度 (mm)	薄翼缘破坏	21.3	19.4	20.4
		中等厚度翼缘破坏	—	—	24.6
		厚翼缘破坏	41.5	32.9	33.6
	撬力/kN	薄翼缘破坏	36.3	31.6	42.5
		中等厚度翼缘破坏	—	—	23.1
		厚翼缘破坏	0	0	0
算例(2)	端板厚度 /mm	薄翼缘破坏	20.3	18.8	19.7
		中等厚度翼缘破坏	—	—	24.8
		厚翼缘破坏	39	31.2	31.3
	撬力/kN	薄翼缘破坏	34.7	28.2	39.5
		中等厚度翼缘破坏	—	—	16.2
		厚翼缘破坏	0	0	0
算例(3)	端板厚度 /mm	薄翼缘破坏	19.8	18.1	19
		中等厚度翼缘破坏	—	—	20.1
		厚翼缘破坏	47	36.7	37.6
	撬力/kN	薄翼缘破坏	31.5	27.4	36.9
		中等厚度翼缘破坏	—	—	13.5
		厚翼缘破坏	0	0	0

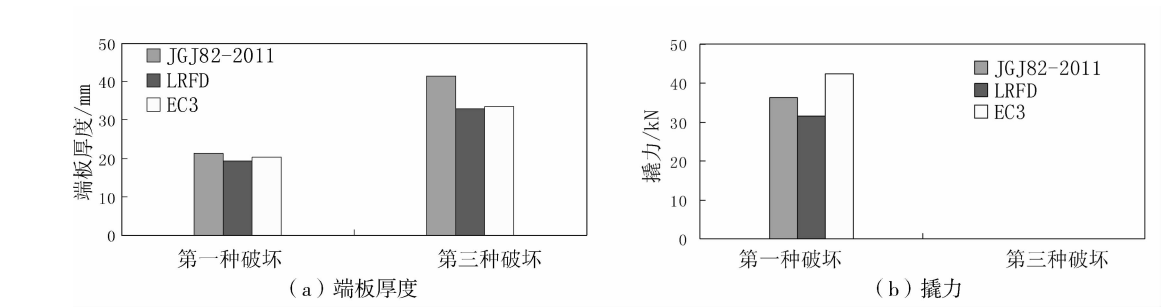


图 9 算例(1)计算结果比较

Fig. 9 Comparison of calculated results of example(1)

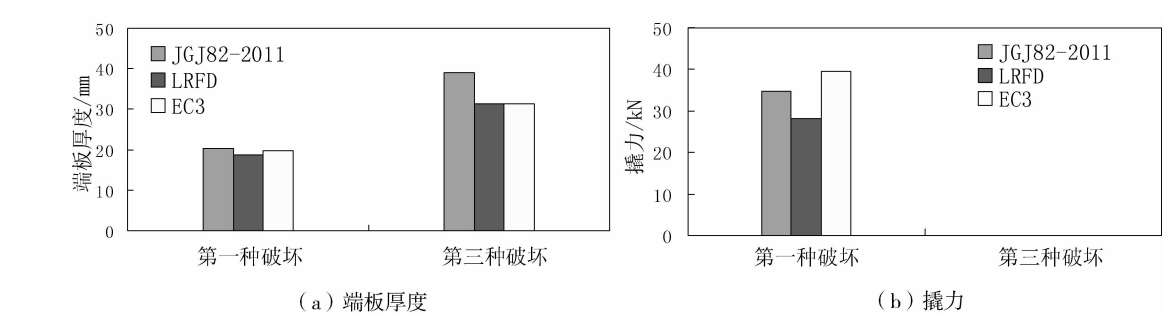


图 10 算例(2)计算结果比较

Fig. 10 Comparison of calculated results of example(2)

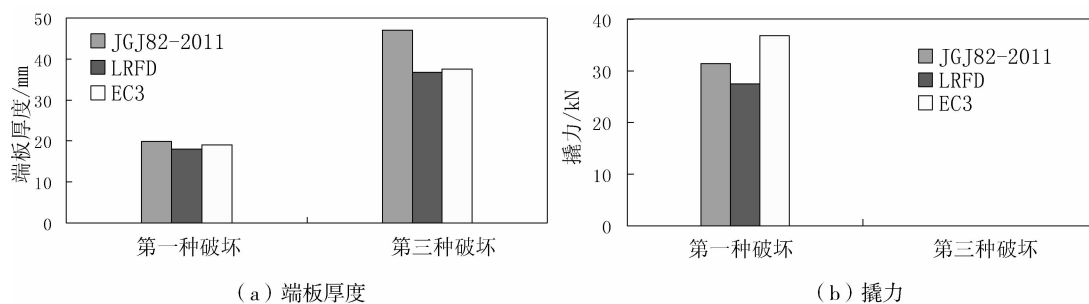


图 11 算例(3)计算结果比较

Fig. 11 Comparison of calculated results of example(3)

## 5 结 语

(1)我国《钢结构设计规范》(GB50017-2003)和《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS102:2002)均未明确提出撬力的计算,我国《钢结构高强度螺栓连接技术规程》(JGJ82-2011)采用 T 型件模型理论进行高强度螺栓端板连接设计,首次引入了撬力的影响,计算更加精确。

(2)我国 JGJ82-2011 规程和美国 LRFD 规范通过引入破坏模式系数  $\alpha'$  考虑 T 型件模型的三种破坏形式,欧洲 EC3 规范则直接按 T 型件三种破坏形式分别计算,由此可见,中美欧规范高强螺栓连接设计理论一致,只在一些具体参数取值上存在一些差异。

(3)算例结果表明,按厚板设计时,我国 JGJ82-2011 规程设计稍偏安全,按薄板设计时我国规范与美欧规范设计基本一致,撬力计算值介于美欧规范之间。我国 JGJ82-2011 规程设计值既保证了一定的安全储备,又不至于浪费,设计端板和螺栓适中。而且设计过程中不需按 T 型件三种破坏形式逐一试算,简化了过程,更加便于工程应用,具有较好的适用性。

## 参考文献 References

- [1] 王 燕. 钢结构半刚性梁柱节点连接的杠杆力分析与计算[J]. 工业建筑, 2004, 34(7): 70-72.  
WANG Yan, Analysis on prying force of semi-rigid beam-column connections of steel structure[J]. Industrial Construction, 2004, 34(7): 70-72.
- [2] 王 燕, 侯兆欣, 郑 杰. 高强螺栓连接考虑杠杆力作用的设计方法[J]. 建筑钢结构进展, 2007, 9(2): 27-33.  
WANG Yan, HOU Zhao-xin, ZHENG Jie, Design method for high-strength bolt connection considering prying action[J]. Progress in Steel Building Structures, 2007, 9(2): 27-33.
- [3] 王 燕, 郑 杰. 高强螺栓端板连接的撬力分析与研究[J]. 工业建筑, 2008, 38(9): 99-103.  
WANG Yan, ZHENG Jie. Study on the prying force of high strength bolt in extended end-plate connection[J]. Industrial Construction, 2008, 38(9): 99-103.
- [4] 王 燕. 钢结构半刚性连接设计理论及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
WANG Yan, Design theory and engineering application of semi-rigid connections in steel structure[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.
- [5] WANG Xian-tie, HAO Jiping, SUN Tong. Study on the seismic behaviour of through-bolt end plate moment connections for concrete-filled steel tube column[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2007, 39(4): 512-519.
- [6] European Committee for Standardisation(CEN). Eurocode 3, Design of Steel Structures, Part 1. 8: Design of Joints [S]. Brussels: prEN 1993-1-8, 2008.
- [7] American Institute of Steel Construction. Manual of Steel Construction LRFD(Second Edition), Volume II [S]., Chicago: American Institute of Steel Construction, 2003.
- [8] 中华人民共和国建设部, GB50017-2003 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.  
The ministry of construction of the peoples republic of China, GB50017-2003 Code for design of steel structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2003.



- [9] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 北京:科学出版社,2001.  
CHEN Shao-fan. Design Principles of Steel Structure[M]. Beijing: Science Press,2001.
- [10] 中国建筑金属结构协会建筑钢结构委员会,中国建筑标准设计研究院. CECS 102:2002 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程 [S]. 北京:中国计划出版社. 2003.  
Construction steel structure committee of China Construction Metal Structure Association, China Institute Of Building Standard Design And Research. CECS 102:2002 Technical specification for steel structure of light-weight buildings with gabled frames[S]. Beijing: China Planning Press,2003.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部, JGJ82-2011 钢结构高强度螺栓连接技术规程[S]. 北京:中国计划出版社, 2011.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, JGJ82-2011 Technical specification for high strength bolt connections of steel structures[S]. Beijing: China Planning Press,2011.
- [12] AGERSKOV H. High-strength bolted connections subject to prying[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1976, 102(1):161-175.
- [13] AGERSKOV H. Analysis of bolted connections subject to prying[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1977, 103(11):2145-2163.
- [14] 王 萌,王 燕,柴 昶,等. 欧洲规范 EC3 高强螺栓等效 T 形件的有效长度及承载力研究[J]. 建筑钢结构进展, 2009, 11(3):58-62.  
WANG Meng, WANG Yan, CHAI Chang, et al. Effective length of an equivalent T-stub for high-strength bolted connections in EC3 and study on the resistance[J]. Progress in Steel Building Structures, 2009, 11(3):58-62.
- [15] STRUIK J H A, DE BACK J. Tests on bolted T-stubs with respect to bolted beam-to-column connections[R]. The Netherlands:Report6-69-13, Stevin Laboratory, Delft University of Technology, Delft, 1969.

## Study on design methods of extended end-plate connection according to norms of China, America and Europe

LIU Xiu-li<sup>1,2</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Civil Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

**Abstract:** In order to study the design methods of extended end-plate bolted connection, design methods end-plate connection according to JGJ82-2011, LRFD and EC3 are compared and analyzed in the paper. Similarities and differences between the three are summed up. The results show that coefficient  $\alpha'$  is introduced to consider three failure modes of T-stub both in design methods of end-plate connection according to JGJ82-2011 and LRFD. But in the design method of end-plate connection according to EC3, the end-plate thickness and prying force is calculated directly according to three failure modes of T-stub. In "Technical Specification for High-strength Bolts Connection of Steel Structure" JGJ82-2011, design method considering prying force of end-plate connection is presented for the first time in China. The design method of extended end-plate bolted connection is more closed to the Engineering practices.

**Key words:** high strength bolt; extended end-plate connection; T-stub; prying force