

文章编号:1673-2049(2018)02-0001-07

# 钢结构用自锁式单向螺栓抗拉刚度分析模型

李国强<sup>1,2</sup>, 张杰华<sup>2</sup>

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

**摘要:**对 8.8 级和 10.9 级的 M16 和 M20 共 4 种型号的国产单向螺栓 STUCK-BOM 进行了轴向拉伸试验, 每种型号的单向螺栓采用 3 种不同厚度连接钢板进行轴向拉伸, 得出了各组试验单向螺栓轴向抗拉刚度; 对单向螺栓的轴向拉伸过程进行了理论分析, 通过理论推导得出了 3 种轴向变形的理论计算公式, 并由此得出了单向螺栓轴向抗拉刚度的理论计算公式; 将单向螺栓轴向抗拉刚度理论值与试验值进行比较。结果表明: 单向螺栓轴向拉伸存在单向螺栓拔出破坏和单向螺栓螺杆拉断破坏 2 种破坏模式; 单向螺栓的轴向变形可分为螺杆轴向变形、套筒轴向变形以及套筒与锥头间滑移的轴向分量 3 个部分, 其中套筒与锥头间滑移的轴向分量对轴向抗拉刚度起控制作用; 单向螺栓轴向抗拉刚度理论值与试验值吻合较好, 单向螺栓轴向拉伸理论分析模型具有较好的可靠性。

**关键词:**单向螺栓; 轴向拉伸; 分析模型; 抗拉刚度

**中图分类号:** TU375.4

**文献标志码:** A

## Analysis Model of Tensile Stiffness of Self-lock One-side Bolt for Steel Structure

LI Guo-qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jie-hua<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Axial tensile tests were conducted for 4 types of domestic one-side bolt STUCK-BOM of M16 and M20 in 8.8 and 10.9 levels. The axial tension test of each type of one-side bolt was carried out with 3 different thickness connecting steel plates. The axial tensile stiffness of the one-side bolt in each test was obtained. The axial tension process of one-side bolt was theoretically analyzed. Three theoretical formulas for axial deformation were obtained through theoretical deduction, and the theoretical formula for axial tensile stiffness of one-side bolt was obtained. The theoretical and experimental values of axial tensile stiffness of one-side bolt were compared. The results show that there are 2 failure modes of one-side bolt in axial tension, including pull-out failure and screw breaking failure. The axial deformation of one-side bolt can be divided into 3 parts, including axial deformation of screw, axial deformation of sleeve and axial component of slip between sleeve and cone head. The axial component of slip between sleeve and the cone head has a control effect on the axial tensile stiffness. The theoretical value of axial tensile stiffness of one-side bolt is in good agreement with the test value, and the theoretical analysis model of axial tension has good reliability.

**Key words:** one-side bolt; axial tension; analysis model; tensile stiffness

收稿日期: 2017-06-21

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0701200)

作者简介: 李国强(1963-), 男, 湖南株洲人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: gqli@mail.tongji.edu.cn。

0 引言

单向螺栓是指连接使用时仅需从被紧固板材一侧进行紧固的螺栓,用于封闭截面连接等不易同时触及连接件两侧的构件连接。

目前,国外有多种不同的单向螺栓产品,例如英国 Lindapter International 公司的 Hollo-Bolt 以及根据 Hollo-Bolt 改进而成的 RMH 螺栓<sup>[1-3]</sup>和 EHB 螺栓<sup>[4-5]</sup>、英国 Advanced Bolting Solutions 公司的 Molabolt 螺栓、英国 Blind Bolt 公司的 Blind Bolt 螺栓、美国 LNA Solutions 公司的 BoxBolt, Huck International 公司的 BOM, HSB<sup>[6]</sup>和 Ultra-Twist 螺栓、澳大利亚 Ajax Engineered Fasteners 公司的 ONESIDE Fastener 螺栓、荷兰 Flowdrill B V 公司的 Flowdrill<sup>[7]</sup>技术等。然而,中国以前没有成熟的单向螺栓产品。

国内外学者对于单向螺栓产品以及单向螺栓连接节点进行了研究<sup>[8-17]</sup>,但主要侧重于单向螺栓的承载力性能,对于单向螺栓抗拉刚度还没有提出比较完善的理论模型。本文根据自锁式单向螺栓研制开发时完成的轴向拉伸试验结果,进一步研究了自锁式单向螺栓的初始抗拉刚度,结合理论计算结果和试验结果提出了单向螺栓初始抗拉刚度分析模型。本文中研究的单向螺栓抗拉刚度为单向螺栓本身的抗拉刚度,即单向螺栓在预拉力消失后的抗拉刚度,而预拉力消失以前的单向螺栓抗拉刚度包含钢板的刚度。

1 单向螺栓简介

钢结构用自锁式单向螺栓可以方便地用于封闭截面构件的连接,如图 1 所示。安装时把单向螺栓穿入连接板件,使钢垫圈与连接板贴紧(橡胶垫圈需进入螺栓孔内);然后,使用扳手固定住钢垫圈,同时,使用扭矩扳手或电动扳手拧紧螺栓头,此时,由于锥头已经被套筒锁住,螺杆和锥头间发生相对转动,锥头不断向螺栓头方向移动,进而使套筒撑开,套筒撑开的四肢卡住连接钢板;拧紧螺栓头至安装扭矩,安装完成。图 2 为钢结构用自锁式单向螺栓安装前后示意。

本文研究采用的是由同济大学研制开发的钢结构用自锁式单向螺栓 STUCK-BOM<sup>[18]</sup>,该螺栓包括锥头、套筒、橡胶垫圈、钢垫圈、标准螺杆 5 个部件,按图 3 所示顺序拼装单向螺栓即可成型。

此钢结构用自锁式单向螺栓有 8.8 级与 10.9



图 1 钢结构用自锁式单向螺栓安装示意

Fig. 1 Schematic Diagram for Installation of Self-lock One-side Bolt for Steel Structure

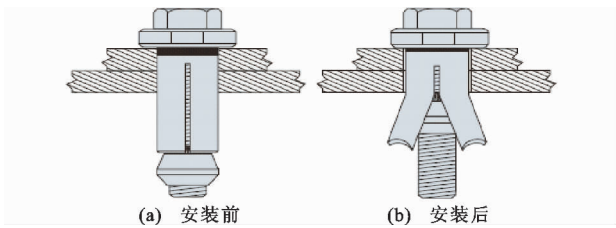


图 2 钢结构用自锁式单向螺栓安装前后示意

Fig. 2 Schematic Diagram of Self-lock One-side Bolt for Steel Structure Before and After Installation

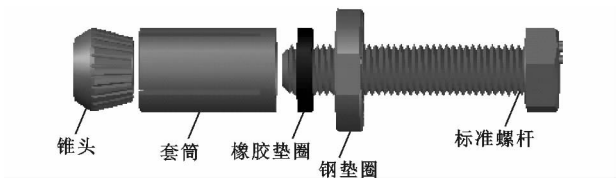


图 3 钢结构用自锁式单向螺栓组成部件

Fig. 3 Components of Self-lock One-side Bolt for Steel Structure

级 2 种级别,分别代表螺杆使用标准 8.8 级和 10.9 级高强度螺栓全螺纹螺杆,每种强度等级螺栓的型号、尺寸与适用范围如表 1 所示。

表 1 钢结构用自锁式单向螺栓型号、尺寸与适用范围

Tab. 1 Models, Sizes and Application Scopes of Self-lock One-side Bolts for Steel Structure

螺栓型号	螺杆尺寸	适用连接板厚度/mm
8.8-SB16-1	M16×75	12~29
8.8-SB16-2	M16×100	29~50
8.8-SB16-3	M16×120	50~71
8.8-SB20-1	M20×90	20~36
8.8-SB20-2	M20×120	36~60
8.8-SB20-3	M20×150	60~86
10.9-SB16-1	M16×75	12~29
10.9-SB16-2	M16×100	29~50
10.9-SB16-3	M16×120	50~71
10.9-SB20-1	M20×90	20~36
10.9-SB20-2	M20×120	36~60
10.9-SB20-3	M20×150	60~86

2 国产自锁式单向螺栓轴向拉伸试验

2.1 试验方案

试验使用单向螺栓连接 2 块方形辅助构件,如

图 4 所示,中间连接板厚度  $h$  随单向螺栓型号不同(可连接厚度不同)而改变,测量中间连接板随着荷载增加被逐渐拉开的位移。8.8 级与 10.9 级单向螺栓的试验编号、螺栓型号与连接板厚度如表 2,3 所示,每组试验重复 3 次。

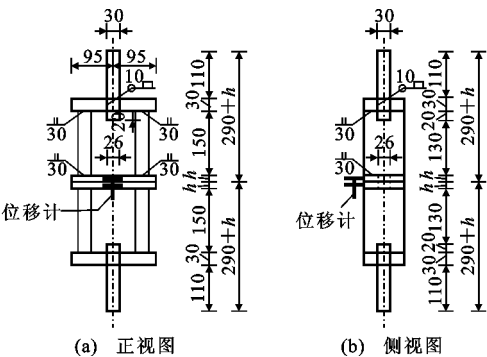


图 4 轴向拉伸试验辅助构件(单位:mm)

Fig. 4 Auxiliary Components of Axial Tensile Test (Unit:mm)

表 2 钢结构用国产自锁式 8.8 级单向螺栓轴向拉伸试验方案

Tab. 2 Axial Tensile Test Scheme of Domestic Class 8.8 Self-lock One-side Bolt for Steel Structure

螺栓型号	试验连接的钢板厚度/mm	试验编号
8.8-SB16-1	20	L-8.8-SB16-1-1
	24	L-8.8-SB16-1-2
	28	L-8.8-SB16-1-3
8.8-SB16-2	32	L-8.8-SB16-2-1
	40	L-8.8-SB16-2-2
	50	L-8.8-SB16-2-3
8.8-SB16-3	50	L-8.8-SB16-3-1
	60	L-8.8-SB16-3-2
	70	L-8.8-SB16-3-3
8.8-SB20-1	28	L-8.8-SB20-1-1
	32	L-8.8-SB20-1-2
	36	L-8.8-SB20-1-3
8.8-SB20-2	36	L-8.8-SB20-2-1
	50	L-8.8-SB20-2-2
	60	L-8.8-SB20-2-3
8.8-SB20-3	60	L-8.8-SB20-3-1
	70	L-8.8-SB20-3-2
	80	L-8.8-SB20-3-3

2.2 试验结果

钢结构用国产自锁式单向螺栓抗拉承载力较高。单向螺栓在轴向受拉时有 2 种破坏模式:①单向螺栓从螺栓孔中拔出;②单向螺栓的螺杆被拉断。

单向螺栓受拉时,除螺杆发生拉伸变形外,套筒与螺栓锥头间还可能发生相对滑移,因此抗拉刚度

表 3 钢结构用国产自锁式 10.9 级单向螺栓轴向拉伸试验方案

Tab. 3 Axial Tensile Test Scheme of Domestic Class 10.9 Self-lock One-side Bolt for Steel Structure

螺栓型号	试验连接的钢板厚度/mm	试验编号
10.9-SB16-1	20	L-10.9-SB16-1-1
	24	L-10.9-SB16-1-2
	28	L-10.9-SB16-1-3
10.9-SB16-2	32	L-10.9-SB16-2-1
	40	L-10.9-SB16-2-2
	50	L-10.9-SB16-2-3
10.9-SB16-3	50	L-10.9-SB16-3-1
	60	L-10.9-SB16-3-2
	70	L-10.9-SB16-3-3
10.9-SB20-1	28	L-10.9-SB20-1-1
	32	L-10.9-SB20-1-2
	36	L-10.9-SB20-1-3
10.9-SB20-2	36	L-10.9-SB20-2-1
	50	L-10.9-SB20-2-2
	60	L-10.9-SB20-2-3
10.9-SB20-3	60	L-10.9-SB20-3-1
	70	L-10.9-SB20-3-2
	80	L-10.9-SB20-3-3

较普通螺栓小。

由轴向拉伸荷载-位移曲线可得各组单向螺栓初始抗拉刚度的试验值,并用于后文中对单向螺栓初始抗拉刚度理论值进行检验。

3 自锁式单向螺栓拉伸变形(柔度)的组成

图 5 为自锁式单向螺栓受拉前后的简图。从图 5 可以看出,自锁式单向螺栓的拉伸变形由三部分组成:①螺杆的拉伸变形;②套筒分肢受到钢板和锥头的挤压发生变形;③在拉力作用下,螺杆与锥头作为一个整体被往上拉,产生从套筒上侧拔出的趋势,使锥头与套筒间发生相对滑移。因此,自锁式单向螺栓的拉伸变形(柔度)可表示为

$$\delta_{sb} = \delta_{lg} + \delta_{tt} + \delta_{slip} \tag{1}$$

式中: $\delta_{sb}$ 为单向螺栓的拉伸变形; $\delta_{lg}$ 为螺杆的拉伸变形; $\delta_{tt}$ 为套筒的变形; $\delta_{slip}$ 为锥头与套筒间的相对滑移。

因此,自锁式单向螺栓的初始抗拉刚度可以通过这三部分的柔度系数来表达,即

$$k_{sb} = \frac{1}{1/k_{lg} + 1/k_{tt} + 1/k_{slip}} \tag{2}$$

式中: $k_{sb}$ 为单向螺栓的初始抗拉刚度系数; $k_{lg}$ 为螺

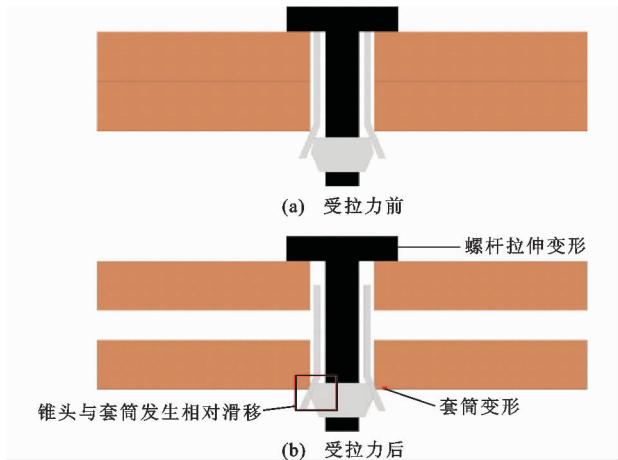


图5 自锁式单向螺栓受拉示意图

Fig. 5 Schematic Diagram of Self-lock

## One-side Bolt Under Tension

杆的抗拉刚度系数; $k_{tt}$ 为套筒的径向变形刚度系数; $k_{slip}$ 为锥头与套筒间相对滑移贡献的刚度系数。

## 4 自锁式单向螺栓初始抗拉刚度的理论计算模型

### 4.1 螺杆的抗拉刚度系数 $k_{lg}$

标准螺杆的抗拉刚度系数  $k_{lg}$  可以参考欧洲规范<sup>[19]</sup>给出的计算公式,即

$$k_{lg} = 1.6 A_s / L_b \quad (3)$$

$$L_b = t_{T1} + t_{T2} + t_{w1} + t_{w2} + \frac{1}{2}(t_h + t_n) \quad (4)$$

式中: $A_s$ 为螺杆的有效面积,对于 SB16,  $A_s = 157 \text{ mm}^2$ ,对于 SB20,  $A_s = 245 \text{ mm}^2$ ;  $L_b$ 为螺杆长度; $t_{T1}, t_{T2}$ 为2块连接板厚度; $t_{w1}$ 为钢垫圈厚度,对于 SB16,  $t_{w1} = 8 \text{ mm}$ ,对于 SB20,  $t_{w1} = 10 \text{ mm}$ ;  $t_{w2}$ 为橡胶垫圈厚度,对于 SB16,  $t_{w2} = 5 \text{ mm}$ ,对于 SB20,  $t_{w2} = 6 \text{ mm}$ ;  $t_h$ 为螺栓头高度,对于 SB16,  $t_h = 5 \text{ mm}$ ,对于 SB20,  $t_h = 6 \text{ mm}$ ;  $t_n$ 为锥头高度,对于 SB16,  $t_n = 18 \text{ mm}$ ,对于 SB20,  $t_n = 22 \text{ mm}$ 。

因此,螺杆的抗拉刚度  $K_{lg}$ 为

$$K_{lg} = k_{lg} E \quad (5)$$

式中: $E$ 为螺杆的弹性模量。

### 4.2 套筒的径向变形刚度系数 $k_{tt}$

文献[20]曾经计算了英国类似单向螺栓 Hollow Bolt 的套筒变形,本文计算方法参考文献[20]的方法,并结合国产自锁式单向螺栓的实际情况改进而来。

由于套筒仅受到来自钢板与锥头的力,因此套筒的实际受力范围只有钢板与锥头之间的一小部分,如图6套筒中的  $K$  点和  $L$  点之间。将套筒沿径

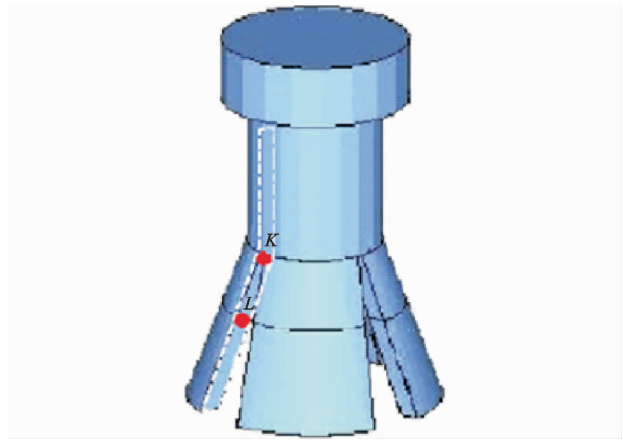


图6 套筒简图

Fig. 6 Schematic Diagram of Sleeve

向剖开,取横截面进行受力分析,如图7所示,其中, $s_1$ 为  $K$  点到套筒肢延长线与轴线交点的距离, $s_2$ 为  $L$  点到套筒肢延长线与轴线交点的距离, $d_{tcm}$ 为锥头最宽处直径, $d_{tct}$ 为锥头顶部直径, $\alpha$ 为套筒肢撑开的角度, $q_b$ 为套筒与锥头的接触压应力, $B$ 为螺杆受到的力。

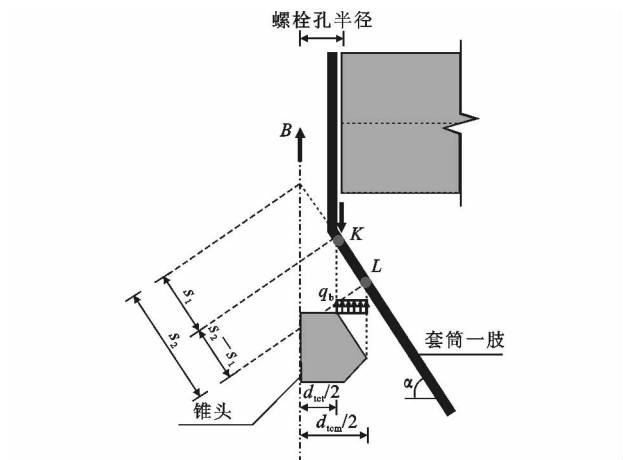


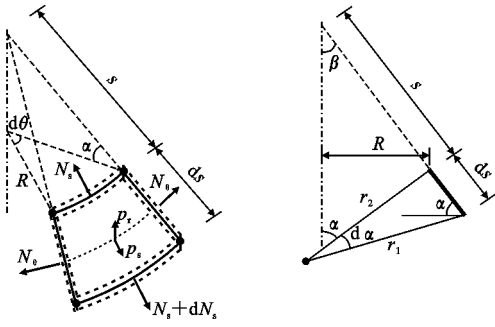
图7 套筒受力分析

Fig. 7 Stress Analysis of Sleeve

图7中, $K$  点到  $L$  点间为套筒的受力段,钢板在  $K$  点把集中线荷载传递到套筒上,锥头在  $K$  点到  $L$  点间把分布面荷载传递到套筒上。从  $K$  点到  $L$  点间取出一段微元体进行分析,如图8所示,其中, $s$ 为套筒微元体到套筒肢延长线与轴线交点的距离, $N_s$ 为套筒微元体受到的径向合力, $N_\theta$ 为套筒微元体受到的环向合力, $p_s$ 为沿套筒径向的应力, $p_r$ 为沿套筒法向的应力, $r_1, r_2, R$ 为尺寸参数。

通过对力的分解,得

$$p_s = -\frac{B}{A_{slp}} \sin(\alpha) \cos(\alpha) \quad (6)$$



(a) 套筒受力微元体侧视图 (b) 套筒受力微元体正视图

图 8 套筒微元体分析

Fig. 8 Microelement Analysis of Sleeve

$$p_r = \frac{B}{A_{slp}} \cos^2(\alpha) \quad (7)$$

$$A_{slp} = \frac{1}{4} \gamma \pi (d_{tcm}^2 - d_{tct}^2) \quad (8)$$

$$\gamma = 1 - \frac{8b_s}{\pi d_{tct}} \quad (9)$$

式中:  $A_{slp}$  为套筒与锥头在水平投影上的接触面积;  $\gamma$  为考虑套筒开缝的修正系数; 对于 SB16,  $d_{tcm} = 25$  mm, 对于 SB20,  $d_{tcm} = 30$  mm; 对于 SB16,  $d_{tct} = 19.2$  mm, 对于 SB20,  $d_{tct} = 24.2$  mm;  $b_s$  为套筒开缝宽度, 对于 SB16,  $b_s = 1.3$  mm, 对于 SB20,  $b_s = 1.6$  mm。

对式(6), (7)进行积分, 得

$$N_s^m = \frac{1}{s} \left[ \int (p_r \cot(\alpha) - p_s) s ds + \omega \right] = \frac{1}{2} \frac{B}{A_{slp}} C_2 s + \frac{1}{s} \omega \quad (10)$$

$$N_\theta^m = p_r \cos(\alpha) s = \frac{B}{A_{slp}} C_1 s \quad (11)$$

其中

$$C_1 = \cos^2(\alpha) \cot(\alpha), C_2 = \cot(\alpha), \omega = \frac{B s_1^2}{A_{slp}} C_3,$$

$$C_3 = \frac{1}{\nu} \cos^2(\alpha) \cot(\alpha) - \frac{1}{2} \cot(\alpha)$$

式中:  $N_s^m$  为单元沿径向的合力;  $N_\theta^m$  为单元沿环向的合力;  $\nu$  为泊松比。

根据胡克定律  $\epsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta - \nu \sigma_s}{E} = \frac{N_\theta - \nu N_s}{E t_s}$  ( $\epsilon_\theta$  为径向应变,  $\sigma_\theta$  为径向应力,  $\sigma_s$  为环向应力,  $t_s$  为套筒厚度, 对于 SB16,  $t_s = 4.375$  mm, 对于 SB20,  $t_s = 5.875$  mm), 可得单元体在水平方向的变形  $\delta_x$  为

$$\delta_x = \epsilon_\theta r_2 \sin(\alpha) = \frac{1}{E t_s} (N_\theta - \nu N_s) s \cos(\alpha) \quad (12)$$

式中: 对于 SB16,  $t_s = 4.375$  mm, 对于 SB20,  $t_s = 5.875$  mm。

将式(10), (11)代入式(12), 单元体在竖直方向的变形  $\delta_y$  可以表示为

$$\delta_y = -\delta_x \tan(\alpha) = -\frac{1}{E t_s} \left[ \frac{B s^2}{A_{slp}} (C_1 - \frac{\nu}{2} C_2) - \nu \omega \right] \sin(\alpha) \quad (13)$$

单元体在竖直方向的最大位移可以认为发生在锥头与套筒接触区域的底部, 因此, 令  $s = s_2$ , 单元体在竖直方向的最大位移可以表示为

$$\delta_y = \frac{B}{E t_s A_{slp}} [\nu s_1^2 C_3 - s_2^2 (C_1 - \frac{\nu}{2} C_2)] \sin(\alpha) \quad (14)$$

根据式(14), 套筒的径向变形刚度系数  $k_{tt}$  为

$$k_{tt} = \frac{t_s A_{slp}}{[\nu s_1^2 C_3 - s_2^2 (C_1 - \nu C_2 / 2)] \sin(\alpha)} \quad (15)$$

因此, 套筒的径向变形刚度为

$$K_{lg} = k_{tt} E \quad (16)$$

#### 4.3 锥头与套筒间的相对滑移刚度系数 $k_{slp}$

首先把锥头与套筒的接触区域等效为一个圆形的接触区, 如图 9 所示 (其中,  $a$  为接触区域半径,  $c$  为黏着区半径), 包含滑动区和黏着区, 根据面积等效计算接触区域半径  $a$ , 如式(17)所示。

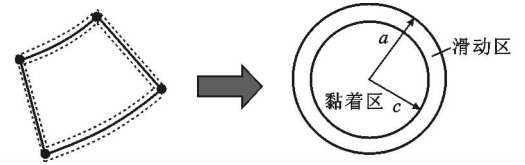


图 9 等效接触区域

Fig. 9 Equivalent Contact Area

$$\pi a^2 = \frac{1}{8} \gamma_1 \gamma_2 t_{n1} \pi (d_{tct} + \frac{d_{tct} + d_{tcm}}{2}) \quad (17)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{2} \left[ \gamma + \frac{\pi d_{nsl} - 4b_s}{\pi (d_{tct} + d_{tcm}) / 2} \right] = \frac{1}{2} \left[ \gamma + \frac{2(\pi d_{nsl} - 4b_s)}{\pi (d_{tct} + d_{tcm})} \right] \quad (18)$$

式中:  $\gamma_1$  为考虑套筒开缝减少接触面积的修正系数;  $\gamma_2$  为考虑锥头棱角减少接触面积的修正系数;  $t_{n1}$  为锥头与套筒接触长度,  $t_{n1} = 3.7$  mm;  $d_{nsl}$  为套筒的内径, 对于 SB16,  $d_{nsl} = 17$  mm, 对于 SB20,  $d_{nsl} = 21$  mm。

接触面的法向应力和切向应力分布可表示为

$$p_r = p_0 [1 - (r/a)^2]^{1/2} \quad (19)$$

$$\tau_r = \tau^{(1)} + \tau^{(2)} \quad (20)$$

$$p_0 = \frac{3F_N}{2\pi a^2} \quad (21)$$

$$\tau^{(1)} = \tau_1 (1 - r^2/a^2)^{1/2} \quad (22)$$

$$\tau^{(2)} = -\tau_2 (1 - r^2/c^2)^{1/2} \quad (23)$$

式中:  $\tau_r$  为接触面上一点的切向应力;  $\tau_1, \tau_2$  为切向

应力参量,可依据相应的边界条件确定; $p_0$  为接触面上的平均法向应力; $F_N$  为接触面上法向合力; $\tau^{(1)}, \tau^{(2)}$  为经典赫兹应力分布式。

根据赫兹应力理论,由应力  $p_r, \tau_r$  产生的表面微观位移  $u_x$  为

$$u_x = \frac{\tau_1 \pi}{32Ga} [4(2-\nu)a^2 - (4-3\nu)x^2 - (4-\nu)y^2] - \frac{\tau_2 \pi}{32Gc} [4(2-\nu)c^2 - (4-3\nu)x^2 - (4-\nu)y^2] \quad (24)$$

式中: $G$  为材料的剪切模量。

假定 2 个边界条件:①黏着区内位移恒定,  $u_x(r)$  为常量,  $r < c$ ;②滑动区内满足库仑摩擦定律,  $\tau_r(r) = \mu p_r(r)$  ( $\mu$  为接触面的摩擦因数),  $c < r < a$ 。

将边界条件代入式(19),(20),(24)可得

$$\tau_1 = \mu p_0 \quad (25)$$

$$\tau_2 = \mu p_0 c/a \quad (26)$$

切向应力  $\tau_r$  在接触面内积分,切向力合力  $F_x$  为

$$F_x = \int \tau_r dS \quad (27)$$

式中: $S$  为接触面积。

将式(21),(25),(26)代入(27),可得

$$c = a(1 - \frac{F_x}{\mu F_N})^{\frac{1}{3}} \quad (28)$$

将式(25),(26)代入式(24)中,可求得黏着区的位移为

$$u_x = \frac{(2-\nu)\pi\mu p_0}{2Ga}(a^2 - c^2) \quad (29)$$

因此,切向接触刚度  $K_{slip}$  为

$$K_{slip} = \frac{B}{u_x \sin(\alpha)} = \frac{4G(a^3 - c^3)}{3(2-\nu)(a^2 - c^2)\sin^2(\alpha)} \quad (30)$$

由于  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ ,刚度系数  $k_{slip} = K_{slip}/E$ ,则

$$k_{slip} = \frac{2(a^3 - c^3)}{3(2-\nu)(1+\nu)(a^2 - c^2)\sin^2(\alpha)} \quad (31)$$

由于锥头与套筒间的摩擦因数  $\mu$  与接触区域半径  $a$  较难确定,这里取不同的摩擦因数  $\mu$  与接触区域半径  $a$  进行计算,观察  $\mu, a$  对  $k_{slip}$  的影响,结果如表 4,5 所示。

表 4 摩擦因数  $\mu$  对  $k_{slip}$  的影响 ( $a=1.4\text{ mm}$ )

Tab. 4 Impact of Friction Coefficient  $\mu$  on  $k_{slip}$  ( $a=1.4\text{ mm}$ )

摩擦因数 $\mu$	$k_{slip}/\text{mm}$	$K_{slip}/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$
0.3	0.522	108
0.4	0.580	120
0.6	0.620	128
0.8	0.636	131
1.0	0.646	133

表 5 接触区域半径  $a$  对  $k_{slip}$  的影响 ( $\mu=0.4$ )

Tab. 5 Impact of Contact Area Radius  $a$  on  $k_{slip}$  ( $\mu=0.4$ )

接触区域半径 $a/\text{mm}$	$k_{slip}/\text{mm}$	$K_{slip}/(\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1})$
1.0	0.415	85
1.2	0.498	102
1.4	0.580	120
1.6	0.663	137
1.8	0.746	154

从表 4,5 可以看出:摩擦因数  $\mu$  较小时(0.3~0.6)相比  $\mu$  较大时(0.6~1.0)对  $k_{slip}$  影响更大;接触区域半径  $a$  与  $k_{slip}$  线性相关,相比摩擦因数  $\mu$  对  $k_{slip}$  影响更大。

至此,单向螺栓轴向抗拉刚度各部分刚度贡献已完成计算,可根据式(2)计算单向螺栓轴向抗拉刚度的理论值,并与试验值进行比较。

### 5 试验结果与理论计算结果对比

国产自锁式单向螺栓轴向抗拉刚度的理论计算结果与试验结果对比见表 6。从表 6 可以看出,理论计算结果与试验结果吻合较好。

表 6 抗拉刚度计算结果与试验结果对比

Tab. 6 Comparison of Calculation Results and Test Results of Tensile Stiffness

试验编号	$K_{sb}$ 试验结果/ ( $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	$K_{sb}$ 计算结果/ ( $\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	相对误差/%
L-8.8-SB16	109.770 0	104.839 70	-4.491
L-8.8-SB20	88.550 8	87.447 30	-1.246
L-10.9-SB16	98.330 8	94.857 54	-3.728
L-10.9-SB20	102.139 7	98.707 72	-3.360

### 6 结 语

(1)钢结构用国产自锁式单向螺栓的初始抗拉刚度由螺杆的拉伸变形、套筒的变形、锥头与套筒间的相对滑移三部分组成,其中最主要的影响因素为锥头与套筒间的相对滑移。

(2)锥头与套筒间接触区域的大小对自锁式单向螺栓初始抗拉刚度的影响较大。

(3)本文提出的自锁式单向螺栓抗拉刚度分析模型结果与试验结果吻合较好。

参考文献:

References:

[1] 吴玉全,汪发.梁-钢管柱节点暗螺栓连接研究概述[J].低温建筑技术,2011(2):48-50.

WU Yu-quan, WANG Fa. Overview of Research of

- Beam-hollow Column Joints with Blind Bolts[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2011(2): 48-50.
- [2] TIZANI W, RIDLEY-ELLIS D J. The Performance of a New Blind-bolt for Moment-resisting Connections [C]// JAURIETTA M A, ALONSO A, CHICA J A. Tubular Structures X: Proceedings of the 10th International Symposium on Tubular Structures, Rotterdam; Balkema A A, 2003: 395-400.
- [3] TIZANI W, AL-MUGHAIIRI A, OWEN J S, et al. Rotational Stiffness of a Blind-bolted Connection to Concrete-filled Tubes Using Modified Holo-bolt[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80(1): 317-331.
- [4] RAHMAN N A. Fatigue Behaviour and Reliability of Extended Holo-bolt to Concrete Filled Hollow Section [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2012.
- [5] TIZANI W, WANG Z Y, HAJIRASOULIHA I. Hysteretic Performance of a New Blind Bolted Connection to Concrete Filled Columns Under Cyclic Loading: An Experimental Investigation [J]. Engineering Structures, 2013, 46: 535-546.
- [6] MOURAD S. Behaviour of Blind Bolted Moment Connections for Square HSS Columns [D]. Hamilton; McMaster University, 1994.
- [7] HOOGENBOOM A J. Flow Drill for the Provision of Holes in Sheet Material; USA, US4454741 [P]. 1984-06-19.
- [8] TABSH S W, MOURAD S, KOROL R M. Structural Safety of Ultra-twist Blind Fasteners in Tension [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1997, 24(2): 211-217.
- [9] MIRZA O, UY B. Behaviour of Composite Beam-column Flush End-plate Connections Subjected to Low-probability, High-consequence Loading [J]. Engineering Structures, 2011, 33: 647-662.
- [10] LIU Y, MALAGA-CHUQUITAYPE C, ELGHAZOULI A Y. Behaviour of Beam-to-tubular Column Angle Connections Under Shear Loads [J]. Engineering Structures, 2012, 42: 434-456.
- [11] ELGHAZOULI A Y, MALAGA-CHUQUITAYPE C, CASTRO J M, et al. Experimental Monotonic and Cyclic Behaviour of Blind-bolted Angle Connections [J]. Engineering Structures, 2009, 31: 2540-2553.
- [12] 王静峰, 张琳, 戴阳. 半刚性钢管混凝土框架梁柱端板连接抗震性能试验研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(11): 13-21.
- WANG Jing-feng, ZHANG Lin, DAI Yang. Seismic Experimental Study of End Plate Connections for Semi-rigid Concrete-filled Steel Tubular Frames [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(11): 13-21.
- [13] WANG J, SPENCER JR B F. Experimental and Analytical Behavior of Blind Bolted Moment Connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 82: 33-47.
- [14] 李国强, 段炼, 陆烨, 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.
- LI Guo-qiang, 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.
- [15] BARNETT T C, TIZANI W, NETHERCOT D A. The Practice of Blind Bolting Connections to Structural Hollow Sections: A review [J]. Steel and Composite Structures, 2001, 1(1): 1-16.
- [16] LEE J, GOLDSWORTHY H M, GAD E F. Blind Bolted T-stub Connections to Unfilled Hollow Section Columns in Low Rise Structures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(8): 981-992.
- [17] LEE J, GOLDSWORTHY H M, GAD E F. Blind Bolted Moment Connection to Sides of Hollow Section Columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(12): 1900-1911.
- [18] 张杰华. 钢结构用国产自锁式单向螺栓力学性能研究 [D]. 上海: 同济大学, 2016.
- ZHANG Jie-hua. Research on Mechanical Properties of Domestic Self-lock One-side Bolt [D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [19] EN 1993-1-8: 2005, Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-8: Design of Joints [S].
- [20] WANG Z Y, TIZANI W, WANG Q Y. Strength and Initial Stiffness of a Blind-bolt Connection Based on the T-stub Model [J]. Engineering Structures, 2010, 32(9): 2505-2517.