

文章编号:1673-2049(2014)02-0051-06

# SC 梁与 CESHRC 柱端板螺栓连接节点试验

张兴虎,马国文,马宏伟,姜维山

(西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

**摘要:**为了验证钢与混凝土组合梁(SC 梁)与高强复合连续螺旋箍约束钢筋混凝土柱(CESHRC 柱)节点的受力机理及抗震性能,对足尺的端板螺栓连接的 SC 梁与 CESHRC 柱节点试件进行了低周反复荷载试验,对节点的抗震受剪承载力进行了分析,并根据试验结果得到了节点核心区抗震受剪承载力的计算公式。结果表明:组合节点受力合理,破坏前梁端形成明显的塑性铰,同时由于高强螺栓预压力的存在以及钢板箍的约束作用,使得核心区混凝土处于三轴受压应力状态,抗震受剪承载力显著提高,大大改善了节点区的抗剪能力,同时也增大了节点的刚度,所得抗震受剪承载力的计算公式可供实际工程参考。

**关键词:**SC 梁;CESHRC 柱;螺栓连接节点;抗震受剪承载力;低周反复荷载试验

**中图分类号:**TU398.9

**文献标志码:**A

## Experiment on End Plate Bolted Connection Node of SC Beam and CESHRC Column

ZHANG Xing-hu, MA Guo-wen, MA Hong-wei, JIANG Wei-shan

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to validate mechanical property and seismic behavior of the steel and concrete composite beams (SC beam) with continuous compound spiral hoop reinforced concrete column (CESHRC) node, the low cyclic loading tests of full scale end plate bolted connection node of SC beam and CESHRC column specimen were carried out. Seismic shear bearing capacity of node was analyzed. Meanwhile, the formulae of seismic shear bearing capacity of joint core were obtained according to the experiment results. Results show that combined node force is reasonable, and the clear plastic hinge is formed at beam end before failure, at the same time due to the presence of high strength bolt preloading and steel plate hoop constraint function, the core concrete is in complex stress state, the seismic shear bearing capacity is improved significantly, the seismic shear capacity of the node domain is greatly improved, and the stiffness of node is increased. The formulae of seismic shear bearing capacity can be used for reference in the practical engineering.

**Key words:** SC beam; CESHRC column; bolted connection node; seismic shear bearing capacity; low cyclic loading test

## 0 引言

随着现代工业的迅速发展,工业化大生产已进

入了各行各业,建筑工业化也同样不可避免。所谓建筑工业化,就是用工业化的生产方式来生产建造工业和民用建筑,它不断地改变着传统施工作业的

收稿日期:2014-03-07

基金项目:国家自然科学基金项目(10572107);河北省科技计划项目(2011188)

作者简介:张兴虎(1956-),男,陕西凤翔人,教授级高级工程师,E-mail:zhangxinghu@126.com。

建造方式、施工工艺和人们的观念,并且是建筑业科技和发展水平的标志,是中国建筑业的发展方向<sup>[1]</sup>。

装配式结构必然会成为中国建筑业发展的方向之一,这是工业化发展的必然结果。然而通过对地震震害的调查发现,装配式结构的节点连接性能在反复荷载作用下的可靠性较差,难以满足对抗震性能的要求,因此在地震区的使用受到很大限制。为提高结构的整体抗震性能,针对这个薄弱环节,需要对装配式结构的节点抗震性能进行研究。

装配式结构体系节点的构造形式繁多,实际工程中端板螺栓连接组合节点应用较为广泛。端板螺栓连接组合梁-混凝土柱结构作为装配式结构的一部分,既具有组合结构共有的优越性,也具有其自身特性。这种结构最大特点是避免了现场焊接,安装速度快,施工性能好<sup>[2]</sup>。由于钢-混组合结构是今后多高层建筑应用的主要结构形式之一,端板螺栓连接组合梁-混凝土柱组合结构无疑具有很高的工程应用价值。

目前各国尚未系统地对组合梁-高强复合连续螺旋箍约束钢筋混凝土柱组合节点进行研究,节点抗震受剪承载力的计算公式也没有统一。本文中笔者进行了 SC 梁与 CSHRC 柱节点的低周反复荷载试验,以研究其受力性能和抗震受剪承载力。

1 试验概述

1.1 试件设计

试验试件采用 2 个足尺模型,另外,为研究节点核心区在高轴压比情况下的工作性能,又设计了核心区的补充试件 LJDB。各试件参数如表 1 所示,具体尺寸及构造见图 1,其中, $d$  为螺栓直径。

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of Specimens

试件 编号	跨度/ mm	层高/ mm	CSHRC 柱		SC 梁		节点核心区	
			长度/ mm	宽度/ mm	宽度/ mm	高度/ mm	钢板箍厚 度/mm	螺栓 型号
LDJ01	3 300	3 250	400	400	380	450	6	8M30
LDJ02	3 300	3 250	400	400	380	450	6	8M30
LDJB			150	150			4	4M20

1.2 试件的材性

组合节点所用的钢筋、钢板的材性如表 2 所示,梁、柱混凝土的强度实测值如表 3 所示。

1.3 加载装置

试验采用柱端施加水平荷载的方式,加载装置如图 2 所示。柱上端竖向力的加载采用双层平面滚轴系统和顶部可转动的油压顶,柱下端采用空间球

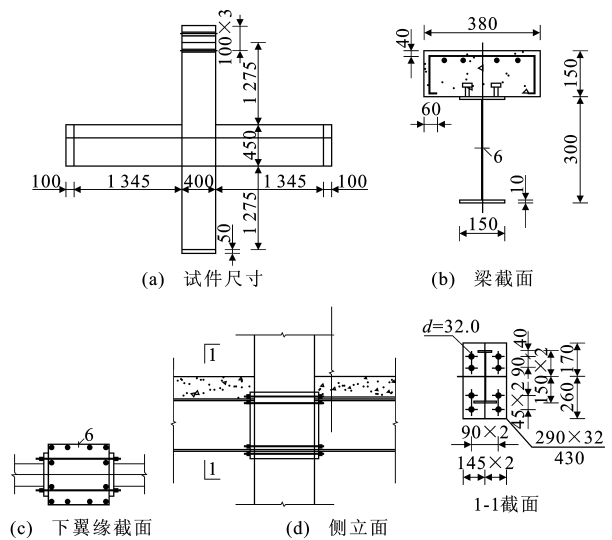


图 1 试件尺寸及构造(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions and Configurations of Specimens (Unit:mm)

表 2 钢材的材料性能

Tab. 2 Material Properties of Steel

材料类型	钢筋		钢板	
直径(板厚)/mm	12	25	4	6
屈服强度/MPa	424.6	415.8	327.5	364.5
极限强度/MPa	597.0	580.9	494.9	526.7
弹性模量/GPa	177	173	172	185
延伸率/%	19	17	23	25

表 3 混凝土的材料性能

Tab. 3 Material Properties of Concrete

试件编号	柱混凝土强度/MPa	梁混凝土强度/MPa
LJD01	39.2	23.3
LJD02	39.2	23.3
LJDB	39.2	

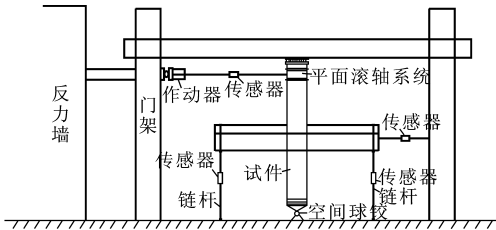


图 2 试验加载装置

Fig. 2 Test Loading Equipment

铰。柱端水平荷载由电液伺服加载系统施加。

1.4 加载制度

根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ 101—96)<sup>[3]</sup>中的规定制定本次试验的加载制度。试件屈服前采用荷载控制并分级加载,试件屈服后采用位移控制,位移值采用屈服时试件的最大位移值,并以

该位移的倍数为级差进行控制加载。在荷载-位移混合控制加载中,最终的屈服荷载以力、位移滞回曲线上的拐点来确定,开裂荷载以人工观察来确定。加载制度见图 3,其中, $u$  为 1 倍屈服位移, $f_y$  为 1 倍屈服荷载。

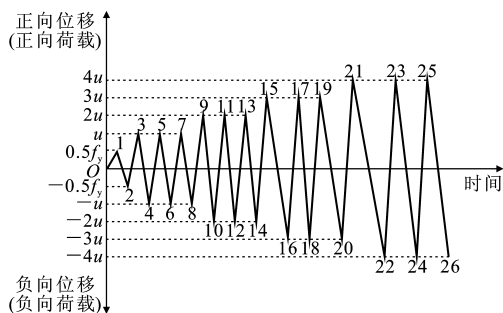


图 3 加载制度

Fig. 3 Loading System

### 1.5 测点布置

应变片主要记录试件某个部位在整个加载过程中应变变化的全过程,本试验应变片主要布置在靠近节点的钢梁翼缘和腹板、节点核心区的螺栓上,具体布置见图 4。为了测定试件在加载过程中的变形和节点核心区的转角延性、剪切延性,在试件上布置相关位移计和百分表。

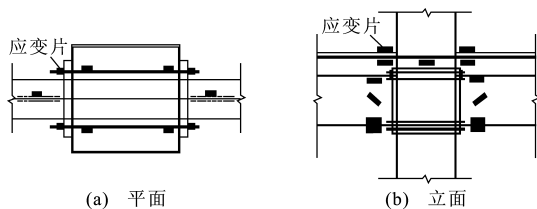


图 4 应变片布置

Fig. 4 Strain Gauge Arrangements

## 2 试件破坏过程

对试件 LJD 做 2 组试验,第 1 组研究试件 JLD01 在不受轴力作用、仅受柱端横向力作用时的性能。对第 2 组试件 JLD02 施加 1 200 kN 的轴向力,再研究柱在此情况下受低周反复荷载时的受力性能。

(1)在第 1 组试件 LJD01 试验中,对螺栓施加较小的预拉力,使螺栓的拉应变保持在  $2 \times 10^{-4}$  左右,当水平作动器内力为推 85 kN 时,组合梁承受负弯矩一侧出现与其轴线垂直的裂缝。当水平荷载为拉 100 kN 时,另一侧也出现相同性质的裂缝。当水平荷载为 125 kN 时,组合梁出现大量裂缝。在之后的荷载循环过程中,相继出现组合梁翼缘在

受压时屈曲,受拉时又重新被拉直的现象。组合梁的腹板也出现屈曲的现象。

(2)在第 2 组试件 LJD02 试验中,为避免出现端板与柱接触面的张开现象,加大了对螺栓的预拉力,使螺栓的初始拉应变保持在  $8 \times 10^{-4}$  左右。当水平作动器内力为推 110 kN 时,组合梁承受负弯矩一侧出现与其轴线垂直的裂缝。当水平荷载为拉 180 kN 时,组合梁翼缘出现在受压时屈曲,受拉时又重新被拉直的现象。当水平荷载为拉 225 kN 时,组合梁一侧的端板加劲肋出现焊缝撕裂,组合梁混凝土被压缩大片剥落,最后组合梁下翼缘被拉断,柱头有很大的水平位移,停止试验。

(3)在模拟节点核心区试件 LJDB 试验中,在受 800 kN 的轴向力作用下,试件 LJDB 没有任何破坏征兆,然后对试件施加往复的水平荷载,当水平荷载为 100 kN 时,试件处于弹性阶段。当水平荷载为 200 kN 时,试件水平变形增大,钢板箍有压屈现象,最后由于基座处混凝土的开裂停止试验。

试件 LJD02 的柱顶水平荷载-层间位移滞回曲线如图 5 所示。在柱脚增加钢板箍约束来避免混凝土局部被压碎,保证了柱底的铰接,同时螺栓的预拉力比较大,防止了端板与柱表面的张开。从图 5 可以看出,在峰值荷载后整体承载力下降很小,屈服后曲线没有捏缩现象,同时在屈服后相同位移下的循环中承载力下降很小,滞回环始终饱满稳定,整个曲线呈理想的梭形,具有良好的耗能性能。

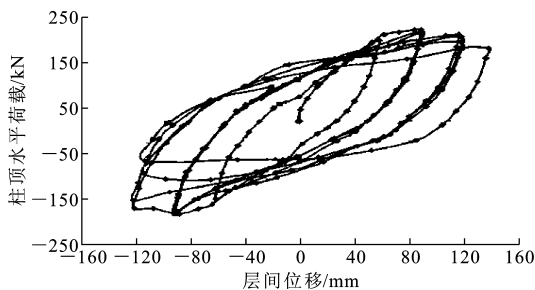


图 5 试件 LJD02 滞回曲线

Fig. 5 Hysteretic Curves of Specimens LJD02

## 3 节点核心区抗震受剪承载力

### 3.1 节点各部分抗剪贡献

根据震害调查和试验研究可知,节点一般都是发生剪切破坏,因此节点的抗震承载能力计算主要是进行节点抗剪计算<sup>[4]</sup>。SC 梁与 CCSHRC 柱节点中,由于高强螺栓预压力的存在以及钢板箍的约束作用,使得核心区混凝土处于复合受力状态,抗震受剪承载力显著提高,因此混凝土承担的剪力比钢筋

混凝土节点混凝土承担的剪力有所提高。本文中把节点的抗剪贡献分为混凝土、钢板箍、箍筋和轴压力的贡献。

### 3.1.1 混凝土的贡献

在组合结构标准节点中,整个节点区的混凝土根据受约束的不同可以分成 2 个部分:节点内部混凝土机构和节点外部混凝土机构<sup>[5]</sup>。SC 梁与 CCSHRC 柱节点中由于高强螺栓预压力的存在以及钢板箍的约束作用,使核心区混凝土承担了大部分的剪力。

根据相关试验及理论分析,节点核心区形成斜压杆。核心区开裂前,由于梁、柱端弯矩传递到节点区的压力作用,沿核心区对角线方向形成混凝土受压带,并在受压带边缘垂直受压带长度方向产生拉应力,随着荷载增加,沿节点对角线产生斜裂缝,在斜裂缝之间形成混凝土斜压杆,其抗剪机理是斜压杆受压机理,这与钢筋混凝土节点相似,但是由于钢板箍和螺栓以及端板的约束作用,使其受剪承载力比钢筋混凝土节点中的混凝土大得多,在梁端弯矩  $M_b$  和剪力  $V_b$  作用下,其受力模式如图 6 所示,其中,  $\theta$  为斜压杆与水平方向的夹角,  $H$  为宽度,可表示为节点核心区对角线的长度乘以某一比值  $\alpha$ ,  $H = \alpha\sqrt{h_c^2 + h_b^2}$ ,  $h_c$  为柱截面高度,  $h_b$  为梁截面高度。

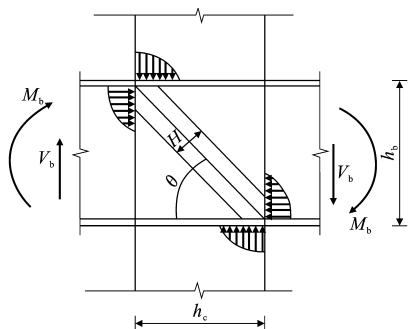


图 6 节点核心区混凝土斜压杆受力模式  
Fig. 6 Concrete Oblique Compression Bar  
Stress Pattern in Joint Core

节点核心区混凝土的承载力由混凝土斜压杆的抗压强度决定,斜压杆的水平分力即混凝土抗剪贡献。混凝土斜压杆的方向和宽度与节点受的压力、弯矩有关。当节点受到轴压力作用时,其核心受压范围较不受轴压力作用节点范围大,故斜压杆的宽度较大,承载力也较大<sup>[6]</sup>。

节点核心区混凝土的抗震受剪承载力  $V_c$  可以用下式表示

$$V_c = f_c b_j H \cos(\theta) \quad (1)$$

式中:  $f_c$  为混凝土抗压强度;  $b_j$  为节点截面宽度;  $d$

为混凝土斜压杆的等效宽度。

一般情况下,节点截面高度  $h_j$  等于柱截面高度  $h_c$ ,梁截面高度  $h_b$  可表示为柱截面高度乘以某一系数  $\beta$ ,写成  $h_b = \beta h_c = \beta h_j$ ,则

$$H = \alpha \sqrt{h_j^2 + \beta^2 h_j^2} = \alpha \sqrt{1 + \beta^2} h_j \quad (2)$$

令特定系数  $\gamma = \alpha \sqrt{1 + \beta^2} \cos(\theta)$ ,则混凝土的抗震受剪承载力为

$$V_c = \gamma f_c b_j h_j \quad (3)$$

$\gamma$  综合反映了节点核心区混凝土在各种约束下的抗剪作用。根据各国试验资料并进行相关回归分析,得出混凝土抗剪影响系数建议值为  $\gamma = 0.18$ 。

综上所述,本文中建议组合 SC 梁与 CCSHRC 柱结构节点中混凝土的抗震受剪承载力计算公式为

$$V_c = 0.18 f_c b_j h_j \quad (4)$$

### 3.1.2 钢板箍的贡献

端板钢板箍主要传递翼缘和腹板的挤压力,侧面钢板箍主要抗剪切,受力状态和 RCS 结构中的钢梁腹板一样(剪压复合应力状态),另外,本文的试验结果和各国试验研究表明,侧面钢板箍在节点破坏时,应力达不到屈服强度,日本建筑学会规定钢板箍的抗震受剪承载力计算中将其乘以系数 0.5 进行折减,故建议钢板箍的抗震受剪承载力  $V_{bw}$  按下式计算

$$V_{bw} = \frac{\sqrt{3}}{6} t_w h_w f_{ya} \quad (5)$$

式中:  $f_{ya}$  为钢板箍单向拉伸屈服强度;  $t_w$  为钢板箍厚度;  $h_w$  为钢板箍长度。

### 3.1.3 箍筋的贡献

在普通的钢筋混凝土结构节点中,节点区箍筋的基本作用是直接参与抗剪、约束节点核心区混凝土和防止柱中纵筋压屈,它对提高节点的抗震性能起着重要的作用,因此无论在施工还是使用期间,节点区箍筋都是不可缺少的。相关试验中指出,在 SC 梁与 CCSHRC 柱节点中,节点区箍筋屈服较晚,不过在极限状态时,节点区箍筋仍能够屈服。在 SC 梁与 CCSHRC 柱节点中,由于设置的一些节点构造措施如钢环箍等对节点区混凝土提供了非常有效的约束作用,从而代替了箍筋的作用,故笔者建议不考虑箍筋对抗震受剪承载力的贡献。

### 3.1.4 轴压力的贡献

轴压力对节点抗震受剪承载力也有一定的影响。轴压力的存在使得核心区混凝土增加了某一个方向的约束,从而抑制了混凝土裂缝的出现和开展,对提高节点的抗裂度与抗震受剪承载力有利。但是

较大的轴压力将加重 SC 梁与 CSHRC 柱节点中核心区内混凝土斜压杆的负担,尤其是当节点剪压比和轴压比两者都较大时,轴压力对节点后期受力极为不利,将会使节点的延性降低。尽管较小的轴压力对抗震受剪承载力的作用是有利的,但是框架柱在地震作用时轴压力会发生变化,由于总弯曲的作用,有的边柱的轴力会减少,在高层建筑中亦有可能变为受拉,所以抗震设计时,应当考虑其对抗震的不利状态。因此本文中建议 SC 梁与 CSHRC 柱节点抗震设计时抗剪计算公式不把轴压力作为有利因素即考虑混凝土作用,非抗震设计时可考虑轴压力  $V_N$  的影响,其计算公式为

$$V_N=0.056N$$

(6)

式中: $N$  为柱轴压力设计值。

3.2 节点核心区抗震受剪承载力计算值与试验值对比

综上所述,本文中提出节点区的抗震受剪承载力计算公式为

$$V_c=0.18f_cb_jh_j+\frac{\sqrt{3}}{6}t_w h_w f_{ys}$$

(7)

足尺试件试验中所测节点核心区的剪力及按本文中建议公式计算所得抗震受剪承载力见表 4。由表 4 可知,按本文中建议公式计算的抗震受剪承载力较试验值大,这是合理的,因为足尺试件试验中发生的是梁铰破坏,并非节点核心区的剪切破坏,因此足尺试件节点核心区抗震受剪承载力计算值要比试验值偏大。

表 4 足尺试件抗震受剪承载力计算值与试验值对比

Tab. 4 Comparison of Seismic Shear Capacity Between Calculation Values and Experiment Values of Full Scale Specimens

试件编号	承载力试验值 $S/\text{kN}$	承载力计算值 $T/\text{kN}$	$TS^{-1}$
LJD01	1 375.8	1 381.5	1.004
LJD02	1 434.2	1 448.7	1.010

4 构件设计

4.1 高强螺栓的预拉力

高强螺栓的预拉力是要高强螺栓杆预拉伸,利用高强螺栓杆的预拉伸,使被连接构件之间压紧而产生静摩擦力来传递剪力。预拉力对节点刚度的影响比较大,在较大的预拉力作用下,节点刚度比较大,节点可以很好地使钢梁与混凝土柱的变形保持一致,其夹角始终保持  $90^\circ$  不变,因而可以按刚性组合节点考虑。AISC 1999 和 Eurocode 3:1993 规范中均取预拉力  $P=0.7A_e f_u$ ,其中, $A_e$  为有效截面面

积, $f_u$  为极限强度,日本规范中的取值亦与《钢构造限界状态设计指南》相仿。在钢结构中,进行端板螺栓连接设计时,施加预拉力  $P=0.6A_e f_u$ ,节点属于半刚性节点。

在组合梁-混凝土柱框架结构中,节点区混凝土采用钢板箍包围,初始刚度有较大提高,与钢结构有较大区别,关键在于预拉力的大小,以下 2 组不同的预拉力试验数据可以说明预拉力对节点刚性的影响,试验数据对比见表 5。在节点试验 1 中实际有效应力  $\sigma$  与极限强度  $f_u$  比为 0.61,直至  $0.5P_u$  ( $P_u$  为节点极限荷载)时节点为刚性,如图 7(a)所示;在节点试验 2 中实际有效应力  $\sigma$  与极限强度  $f_u$  比为 0.68,直至  $0.68P_u$  时节点为刚性,如图 7(b)所示。试验结果表明:节点试验 2 的刚性区段荷载达到应用弹性理论分析框架的极限状态时荷载,故预拉力  $P=0.7A_e f_u$  时,节点可以按刚性节点设计。

表 5 螺栓杆预拉力比较

Tab. 5 Comparison of Bolt Pretension

螺栓型号	预拉力 $P/\text{kN}$	有效截面面积 $A_e/\text{mm}^2$	实际有效应力 $\sigma/\text{MPa}$	极限强度 $f_u/\text{MPa}$	$\sigma f_u^{-1}$
M22	209.79	303	692.38	1 128	0.61
M30	391.00	561	696.97	1 026	0.68

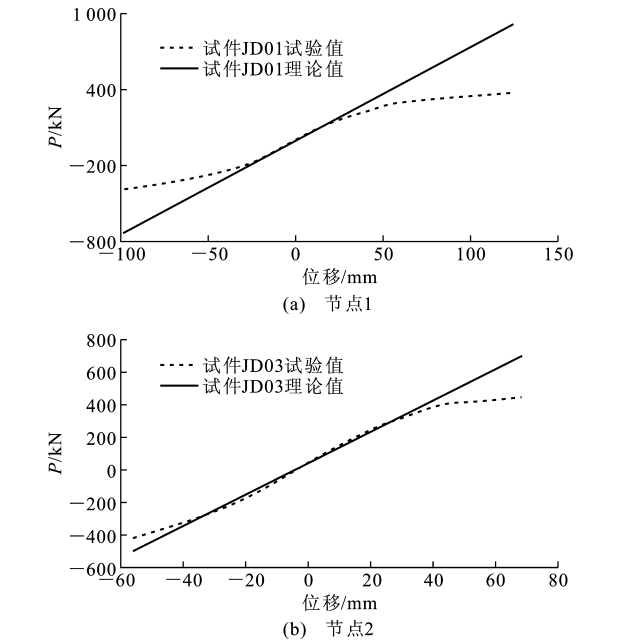


图 7 螺栓杆预拉力-位移关系

Fig. 7 Relations of Bolt Pretension and Displacement

考虑拧紧螺栓时,预拉力  $P$  除使螺栓杆产生拉应力外,还使螺栓杆产生剪应力:①在正常施工条件下,即螺母的螺纹和下支撑面涂黄油润滑剂的条件下,或在原润滑剂未干的情况下拧紧螺栓时,根据试验结果对应力的影响系数可取为 1.2;②考虑螺栓

材质的不均匀性,引进一个折减系数 0.9;③施工时为了补偿螺栓预应力的松弛,一般超张拉幅度为 5%~10%,因此采用一个超张拉系数 0.9;④由于以螺栓的抗拉强度为准,为安全起见,再考虑一个附加安全系数 0.9;⑤考虑端板高强螺栓节点成为刚性节点需要在不利外荷载作用下端板与柱面始终压紧,同时考虑混凝土徐变损失,故增大预拉力 1.2 倍,这样高强螺栓预拉力  $P$  为

$$P=0.729f_uA_e \quad (8)$$

式中:对螺栓 8.8 级,取  $f_u=830$  MPa,对螺栓 10.9 级,取  $f_u=1\,040$  MPa; $P=0.7A_e f_u$ 。

#### 4.2 端板厚度

高强螺栓端板连接是钢结构常用的连接形式,通常采用 T 型构件模型设计理论进行端板和螺栓设计。T 型构件连接在外力作用下,高强螺栓承受拉力,T 型构件受力后由于翼缘发生弯曲变形而形成杠杆作用(撬力作用),撬力使得螺栓拉力变大,对节点强度和性能产生不利影响。当翼缘较厚时,螺栓相对较弱,在受力过程中螺栓达到极限抗拉强度而拉断,T 型构件翼缘仍处在弹性范围,弯曲变形很小,撬力可忽略不计。螺栓受力的计算模型见图 8,其中, $F$  为水平荷载, $a$  为螺栓中心至焊缝边缘距离, $N_t^b$  为螺栓受拉承载力, $M_y$  为翼缘板截面塑性弯矩,其公式为

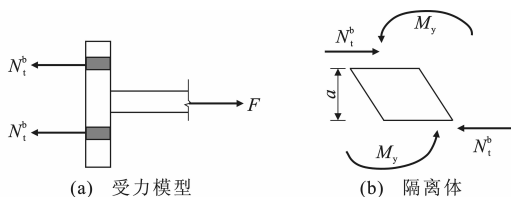


图 8 计算模型

Fig. 8 Calculation Model

$$N_t^b a = 2M_y \quad (9)$$

$$M_y = \frac{1}{6} (b_p/2) t_p^2 f_y \quad (10)$$

式中: $t_p$  为端板厚度; $b_p$  为端板宽度。

联立式(9),(10)用钢材设计强度  $f$  代替屈服强度,即得到端板厚度的计算公式为

$$t_p \geq \sqrt{\frac{6a N_t^b}{b_p f}} \quad (11)$$

## 5 结 语

(1)SC 梁与 CCSHRC 柱端板螺栓连接节点具有较大的承载力和较好的延性,是一种合理的节点形式。

(2)由于高强螺栓预压力的存在以及钢板箍的约束作用,使得节点区混凝土开裂较少,大大改善了节点区的抗剪能力,同时也能提高节点的刚度。

(3)提出的节点核心区抗震受剪承载力计算公式可供工程实际参考。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 严 薇,曹永红,李国荣. 装配式结构体系的发展与建筑工业化[J]. 重庆建筑大学学报,2004,26(5):131-136.  
YAN Wei, CAO Yong-hong, LI Guo-rong. Development of Assembly-type RC Structure and Building Industrialization[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2004, 26(5): 131-136.
- [2] 马宏伟. 组合梁与连续复合螺旋箍混凝土柱节点研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2003.  
MA Hong-wei. Study on the Joints of Composite Beam and Continuous Compound Spiral Hoop Reinforced Concrete Column[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003.
- [3] JGJ 101—96, 建筑抗震试验方法规程[S].  
JGJ 101—96, Specification of Testing Methods for Earthquake Resistant Building[S].
- [4] 毛炜烽,伍云天,肖 岩,等. 高强螺栓连接钢梁-混凝土柱组合节点的抗震性能[J]. 工业建筑,2005,35(11):1-4.  
MAO Wei-feng, WU Yun-tian, XIAO Yan, et al. Experimental Research on Seismic Behavior of Bolted Steel Beam to RC Column Connections[J]. Industrial Construction, 2005, 35(11): 1-4.
- [5] 张晓雷,白国良,戴维忠,等. RCS 组合结构节点受力机理及承载力分析[J]. 工业建筑,2008,38(增 1):602-605.  
ZHANG Xiao-lei, BAI Guo-liang, DAI Wei-zhong, et al. Shear Mechanism and Strength Analysis of RCS Composite Structure Joints[J]. Industrial Construction, 2008, 38(S1): 602-605.
- [6] 罗平航. 钢-混凝土组合梁与连续复合螺旋箍筋混凝土柱节点抗震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2008.  
LUO Ping-hang. Research of Seismic Behavior on the Joint of Steel-concrete Composite Beam and Continuous Compound Spiral Hoop Reinforced Concrete Column [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.