

# 钢材强度对梁柱组合节点性能影响的有限元分析

石永久, 奥晓磊, 王元清, 施刚

(清华大学土木工程系 结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**随着高层钢框架结构梁柱构件逐渐向高强材料、组合受力方向发展,在梁柱组合节点中,钢材强度对节点性能和混凝土楼板组合作用的发挥有显著影响。基于对组合节点的有限元分析,着重比较了在钢材强度提高时,组合作用对节点承载力的影响程度和影响方式的变化。分析结果表明,组合节点的弹塑性极限承载力会随着钢材强度提高而提高,延性有一定的降低,混凝土楼板组合作用的影响相应减小,节点以正弯矩侧混凝土被压溃为失效标志。

**关键词:**钢材强度;组合作用;梁柱节点;有限元分析

**中图分类号:**TU 382 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7329(2008)05-0032-05

## Finite Element Analysis of the Influence of Steel Strength on Beam-to-column Composite Connections

SHI Yong-jiu, AO Xiao-lei, WANG Yuan-qing, SHI Gang

(Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of Ministry of Education, Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China)

**Abstract:** Because high material strength and composite load-bearing are emphasized in constructing members for high-rise steel frame structures, in a composite connection, steel strength has a dramatic influence on both the bearing performance and the composite action of the concrete slab. Based on a finite element analysis, we discuss the composite effect and the connection breaking mode, focusing on the performance change of the composite effect in adopting high strength steel. It can be found from the results that, along with the improvement of the steel strength, the elastic and plastic ultimate strength of the composite connection will increase, the ductility will decrease to a certain extent, and the composite effect of the concrete slab will diminish. The collapse of the concrete in a positive moment side contacting the column flange is viewed as the limiting state of the connection.

**Key words:** steel strength; composite effect; beam-to-column connection; finite element analysis

在典型的钢框架栓焊连接组合节点中(如图1),钢和混凝土通过剪力连接件结合起来共同工作,有效地提高了节点的抗弯承载力和连接刚度,使这种组合型式在经济和防火方面的优越性得以发挥。但随着高强钢材在建筑结构中的应用日益广泛<sup>[1]</sup>,将高强钢材应用于钢框架组合节点时,必定会对节点性能产生一定的影响。节点承载力的提高幅度、节点刚度变化、节点延性和极限变形能力以及节点的抗震性能等问题,都有待深入研究。

本文运用通用有限元数值计算对节点组合作用进

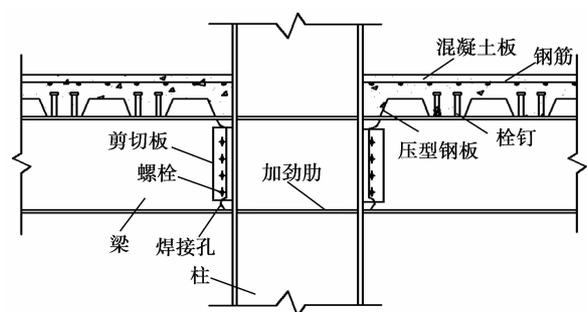


图1 典型的梁-柱组合节点的构造形式  
行了非线性有限元分析,主要考虑了结构模型的钢材

\* 收稿日期:2008-03-06

基金项目:国家自然科学基金项目(50578083);国家自然科学基金项目(50708051)

作者简介:石永久(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事大型钢结构工程研究,(E-mail)shiyj@mail.tsinghua.edu.cn.

强度参数,分析了钢材强度改变对节点性能(承载力、刚度、节点延性)的影响。

### 1 组合节点有限元研究概况

国内外学者运用有限元方法,通过合理的简化,模拟出节点的承载性能和受力特征,在此基础上指导节点试验研究或得出节点计算模型,为组合节点的设计和应用提供了参考依据。

Hajjar<sup>[2]</sup>将 ABAQUS 组合节点有限元模型与其试验结果相比较,主要着眼点为混凝土楼板对节点处钢梁应力应变分布的影响。计算表明由于楼板组合作用,钢梁下翼缘焊接孔处有较大的应变和明显的三向应力集中。这点在 Joh<sup>[3]</sup>的文章中也得以证实。Joh 强调,组合效应引起的下翼缘应力集中是降低节点延性、导致节点断裂破坏的控制性因素,在设计中必须予以考虑。

苏迪<sup>[4]</sup>在有限元建模时忽略了混凝土楼板与钢梁界面的相对滑移,用设置了配筋率的混凝土单元来研究楼板钢筋对组合作用的影响。计算结果表明,如果合理配置楼板钢筋,可以在不降低延性的基础上使节点的承载力有相当程度的提高,有利于实现“强节点弱构件”的抗震理念。

为了讨论混凝土的组合作用,研究中有必要选取更准确的有限元模型来模拟混凝土实际受力。ANSYS 提供了一种 Solid65 单元来模拟混凝土材料<sup>[5]</sup>,该单元采用 W-W 五参数破坏面(当应力达到破坏面时出现压碎或开裂),并采用弥散固定裂缝模型和整体式钢筋模型。并且,引入折减系数和剪力传递系数来修正混凝土本构关系以模拟开裂后混凝土的受力性能,提供了很好的研究平台。

在以往的研究中,普通钢材组合节点的抗震性能得到很多试验和有限元的验证,并且国内外对其已经有了相应的考察方法与评价指标<sup>[6][7]</sup>。随着钢框架中高强度钢材的使用,钢材强度对节点性能的影响已成为新的研究课题。组合作用的发挥与外力的分配会因钢材强度的提高而发生变化。研究者关注的节点的延性耗能能力、塑性转动能力也将会有相应的改变。其设计方法与评价标准还需要大量的试验验证和理论分析。

## 2 节点有限元模型

### 2.1 模型建立

本文采用《建筑抗震设计规范》规定的标准型钢框架栓焊连接节点<sup>[8]</sup>,梁截面为:H400×150×8×12,柱截面为:H450×250×12×16,螺栓取 M20。梁翼缘与柱

翼缘采用全熔透对接焊缝连接,梁腹板通过高强度螺栓,与焊接在柱翼缘上的剪切板连接在一起,见图 2。

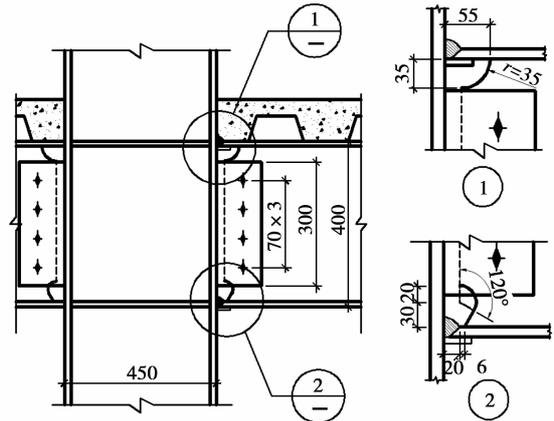


图 2 栓焊连接细部构造

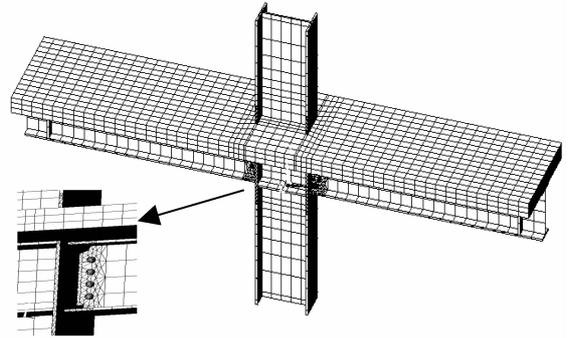


图 3 标准型节点有限元整体模型

文中采用 ANSYS 有限元软件进行建模分析(图 3),模型的具体实现详见文献[9]。另外,在承受水平地震荷载作用时,可将节点转角定义为钢梁梁端上下翼缘中心线的相对转角,按式(1)计算,式中  $x_1, x_2$  为钢梁梁端处上下翼缘水平向的位移,  $d$  为上下翼缘中心线的间距。同时,将节点处柱翼缘外侧的弯矩值作为考察的  $M$  值。

$$\phi = \frac{x_1 - x_2}{d} \quad (1)$$

### 2.2 节点本构参数

在计算钢框架组合节点有限元模型时,本文钢材采用 Hajjar<sup>[2]</sup>提出的考虑屈服强化的本构模型。对于不同强度的钢材,其本构关系的关键参数参见文献[9]。

混凝土等级采用 C30 不变,且不改变板厚和配筋率,本构采用式(2)中的单轴应力应变关系和多线性随动强化准则。

$$y = \begin{cases} \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $x = \epsilon/\epsilon_c, y = \sigma/f_c$ ;

$f_c$  为混凝土单轴抗压强度;

$\epsilon_c$  为与  $f_c$  相应的混凝土峰值应变;

$\alpha_a$ 、 $\alpha_d$  为单轴受压应力-应变曲线上上升段下降段的参数。

### 3 钢材强度对节点性能的影响

#### 3.1 节点弯矩转角曲线

经 ANSYS 计算,得到组合节点弯矩-转角曲线如图 4 所示。

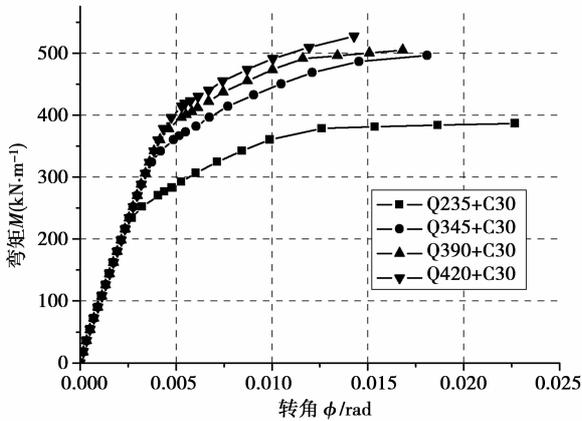


图 4 组合节点弯矩-转角曲线

图 4 曲线表明:

1) 在采用高强度钢材后,节点的弹性阶段承载力比 Q235 有了明显的提高,很大程度归功于钢材屈服强度的提高,梁下翼缘钢材应力达到屈服强度时节点结束弹性段。由于曲线弹性段几乎重合,可知混凝土开裂对节点的弹性阶段承载力影响不大。

2) 转入塑性后,曲线在斜率下降的同时,开始处都要经历一小段由于节点刚度突然变化和混凝土接近峰值应力而引起的有限元计算步数的集中和曲线斜率的不稳定。

3) 随着钢材强度的提高,节点塑性的发展逐渐趋于不平滑,并且从节点屈服后到计算不收敛塑性发展段的长度也有明显下降,Q390 曲线略有折角,Q420 节点破坏时曲线仍在上升过程中,这从一个角度说明,钢材强度提高将伴随着节点脆性的增加。

4) 四个节点均以正弯矩侧与钢柱接触处混凝土的压溃为失效标志,此时节点承载力无法继续提高,有限元单元出现了过大的变形导致难以收敛而计算中止。

5) 钢材强度的提高会使节点的极限承载力有相应的提高,但节点模型的收敛性也会随之变差。由于混凝土强度没有增加,配筋率也保持不变,这使得节点受钢材强度影响时,有利方面表现得不是很明显,而钢材强度也受到了混凝土峰值应力的约束,不能充分地发挥其作用而过早地随着混凝土的压溃而退出工作。

#### 3.2 节点弹性承载力分析

通过有限元计算可以得到节点屈服弯矩和转角如表 1 所示,并与纯钢节点相应指标进行比较可知:

表 1 组合节点弹性承载力计算

钢材强度	$M_{y1}$ kN·m	$\phi_{y1}$ mrad	$M_{y2}$ kN·m	$\phi_{y2}$ mrad	$\frac{M_{y1}}{M_{y2}}$	$\frac{\phi_{y1}}{\phi_{y2}}$
Q235	216	2.361	162	2.073	1.333	1.140
Q345	306	3.410	243	3.113	1.259	1.096
Q390	342	3.852	270	3.456	1.267	1.116
Q420	360	4.057	297	3.810	1.212	1.063

表中, $M_{y1}$  为组合节点屈服弯矩有限元计算值; $\phi_{y1}$  为组合节点弹性极限转角有限元计算值; $M_{y2}$  为纯钢节点屈服弯矩有限元计算值; $\phi_{y2}$  为纯钢节点弹性极限转角有限元计算值。

1) 节点屈服弯矩、弹性转角均随钢材强度提高而增加,提高幅度基本上与钢材屈服点提高幅度相近;

2) 组合节点屈服弯矩较纯钢节点提高约 25%,提高程度随钢材强度提高而降低,但四个节点弹性极限转角变化不大,较纯钢节点略有提高,说明组合作用在弹性阶段有利于节点的受力和变形,可以在不影响变形的前提下有效地提高节点的弹性极限承载力。

#### 3.3 节点承载性能分析

采用 Q235 钢材组合节点试验<sup>[10]</sup>中,节点实测极限转角大致为 0.01rad,因此在有限元分析中,取该转角对应的弯矩值作为节点的抗弯承载力。表 2 比较了钢材强度对节点极限抗弯承载力的影响,并参照我国现行《钢结构设计规范》<sup>[11]</sup>钢-混凝土组合梁负弯矩区设计方法对节点负弯矩承载能力加以分析,计算时取标准值。

表 2 组合节点抗弯承载力计算

钢材强度	$M_1$ kN·m	$M_2$ kN·m	$\frac{M_1}{M_2}$	$M_3$ kN·m	$\frac{M_1}{M_3}$
Q235	361.0	341.8	1.056	267.7	1.349
Q345	444.2	445.3	0.998	351.9	1.262
Q390	472.8	488.3	0.968	385.3	1.227
Q420	490.5	517.1	0.948	407.1	1.205

表中, $M_1$  为组合节点抗弯承载力有限元计算值; $M_2$  为钢结构规范抗弯承载力计算值; $M_3$  为纯钢节点抗弯承载力有限元计算值。

从表 2 可以看出,四种钢材组合节点抗弯承载力均较纯钢节点有 20%~30% 的提高,有利于实现“强节点弱构件”抗震设计理念。但随着钢材强度的提高,楼板组合效应所带来的节点承载力的增加逐渐变小,

说明在较低的混凝土强度匹配下,组合作用的影响有减弱的趋势,尤其对于 Q420 节点,只将纯钢节点抗弯承载力提高了 20%,而带来的可能是钢材脆性的增加、节点延性的减少和过大的节点域应力集中,此时在设计中考虑组合作用将减少节点的安全富余度。

通过比较有限元与钢结构设计规范组合梁方法计算结果,可以发现:

1)两者结果非常接近,只是钢材强度提高后,钢结构设计规范计算值偏大,且数值差距逐渐增大。钢结构设计规范计算在负弯矩区只计入钢筋影响,有限元负弯矩区混凝土也很早就开裂而未参与工作,但由于有限元模拟钢筋采用的是整体式模型,把钢筋弥散于混凝土层中,这样会减少钢筋的力臂从而相应地降低了节点承载力。

2)图 5 比较了不同钢材节点的抗弯承载力相对值,可以看出,相比于纯钢节点,组合节点对于钢材强度影响的反应不是很敏感,承载力增加幅度明显要小。而规范计算所得承载力随钢材强度变化与纯钢节点几乎一致,说明钢结构设计规范组合梁公式对混凝土楼板组合效应的考虑相对较少,钢梁强度为节点承载力主要贡献。

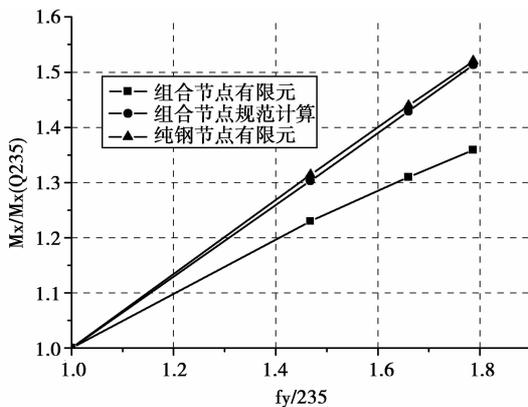


图 5 钢材强度对节点抗弯承载力影响

3)同时,有限元计算结果说明,楼板的组合效应改变了节点的破坏模式,使得主要由钢材强度控制的节点承载力受混凝土压溃的影响,钢材未达到极限强度而过早退出工作,更接近试验破坏模式<sup>[10]</sup>。

### 3.4 节点刚度分析

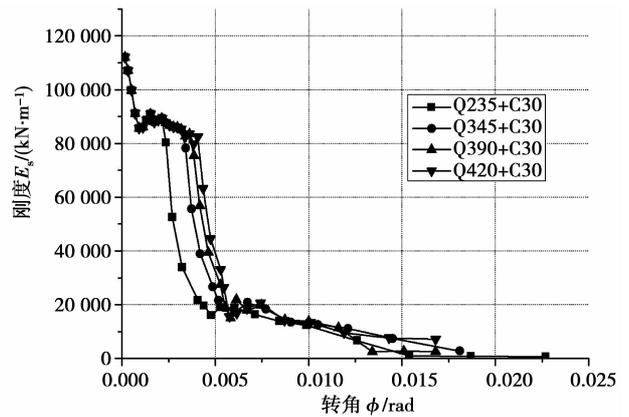
图 6 给出钢材强度对节点刚度的影响,选取式(3)作为考察节点刚度的切线模量,

$$E_s = \frac{M_2 - M_1}{\phi_2 - \phi_1} \quad (3)$$

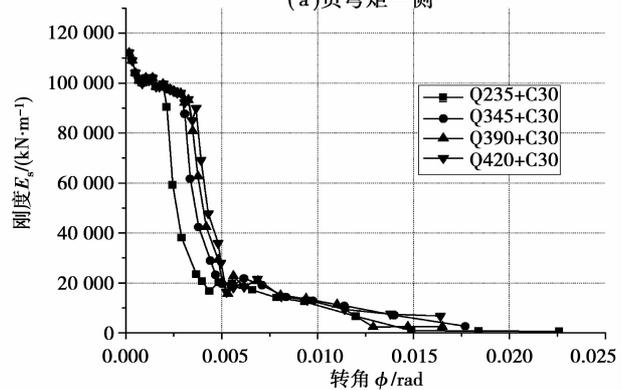
下标 1、2 代表有限元计算的某一步及其后一步。

由图 6 可知:

1)负弯矩一侧由于混凝土拉裂后楼板内钢筋成为主要受力构件,在相同荷载下变形较大,刚度较正弯矩



(a)负弯矩一侧



(b)正弯矩一侧

图 6 钢材强度对节点刚度影响

区有明显的下降。由于正弯矩区混凝土能有效地发挥受压作用,在混凝土开裂后、节点屈服前的弹性段刚度会明显高于负弯矩区,而节点进入塑性后,刚度的变化就相差甚小了。

2)钢材强度提高对于屈服前的节点刚度影响并不显著,曲线几乎重合,弹性阶段节点刚度近于相等。混凝土开裂后,裂缝稳定地扩展,刚度在直线缓慢下降的同时,由于钢材的屈服,到达一定转角后会有一个较大的刚度突变,而钢材强度越高,这个转角值越大,突变也越明显。

3)由此可见,提高钢材强度可以相应地提高节点的受弯承载力,而节点弹性阶段刚度仍然主要受钢材弹性模量控制,并且屈服后节点的塑性发展能力也会较低强度钢材节点有所下降。图中 Q345 节点的塑性段较长,曲线也较为平滑,而 Q390、Q420 则有较多弯折,刚度变化较为突然,显示出了一定的脆性特征。

## 4 结 论

本文讨论了钢材强度对钢框架梁柱组合节点承载性能的影响,通过在有限元模型中选用合适的钢材本构与性能参数,分析了四种钢材十字形组合节点在反对称单调加载时表现出的强度、刚度等性质,并比较了正负弯矩侧受力与破坏模式,得到以下结论:

1) 钢材强度提高后, 节点以正弯矩侧受压混凝土被压溃为失效标志, 弹塑性极限承载力均较纯钢节点有相应提高, 提高幅度不低于 20%, 但小于钢材强度增加幅度。承载力提高以节点延性和材料塑性发展能力的相对降低为代价。

2) 节点破坏模式说明, 在没有相应增加混凝土强度和楼板配筋率的前提下, 混凝土楼板组合作用的发挥程度随着钢梁钢材强度的提高而逐渐降低, 节点塑性发展也逐渐呈现脆性特征。

3) 节点刚度发展呈现典型的三阶段: 弹性阶段、屈服阶段、塑性发展阶段。正弯矩区弹性刚度在混凝土开裂后、节点屈服前高于负弯矩区, 但进入塑性后两者差距变小。

高强度钢材作为建筑结构材料发展的趋势, 在实际工程中有着广阔的应用前景, 能更好地发挥钢框架结构的承载性能和承载效率, 它对节点抗震性能的影响以及所带来的设计方法上的变化有待于进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] UY B. High strength steel-concrete composite columns: applications and design: proceedings of the 2005 structures congress and the 2005 forensic engineering symposium[C]. New York, 2005.
- [2] HAJJAR J F, LEON R T, GUSTAFSON M A, SHIELD C K. Seismic response of composite moment-resisting connections ii: behavior [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(8): 877-885.
- [3] JOH C B, CHEN W F. Seismic behavior of steel moment connections with composite slab[J]. International Journal of Steel Structures, 2001, 1(3): 175-183.
- [4] 苏迪, 石永久, 王元清. 组合效应对钢节点抗震性能的影响因素分析 [J]. 青岛理工大学学报, 2006, 27(1): 36-41. SU Di, SHI Yong-jiu, WANG Yuan-qing. Influence factor analysis of seismic performance of steel beam-column moment connections with composite effect [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2006, 27(1): 36-41.
- [5] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [6] 王先铁, 郝际平, 孙彤, 等. 新型方钢管混凝土梁柱节点抗震性能研究 [J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(2): 73-77. WANG Xian-tie, HAO Ji-ping, SUN Tong, et al. Experimental study on seismic behavior of penetrated interior diaphragm on one side beam-to-column connection for concrete - filled square steel tube [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(2): 73-77.
- [7] 孙飞飞, 李国强, 胡凌华. 梁柱组合节点的试验研究新进展 [J]. 建筑钢结构进展, 2004, 6(2): 37-42. SUN Fei-fei, LI Guo-qiang, HU Ling-hua. New development in experimental research on beam-to-column composite joints [J]. Progress in Steel Building Structures, 2004, 6(2): 37-42.
- [8] GB50011-2001. 建筑抗震设计规范 [S].
- [9] AO X L, SHI Y J, WANG Y Q. Influence analysis of steel strength on composite beam-to-column connection in steel frame structure: proceedings of the 9th international conference on steel space & composite structures [C]. Beijing, 2007.
- [10] 石永久, 苏迪, 王元清. 混凝土楼板对钢框架梁柱节点抗震性能影响的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 26-31. SHI Yong-jiu, SU Di, WANG Yuan-qing. An experimental study on the seismic performance of beam-column joints in steel frames with the effect of concrete slabs considered [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 26-31.
- [11] GB50017-2003. 钢结构设计规范 [S].

(编辑 陈 蓉)