

高强度钢柱高温下承载力数值计算方法

王卫永¹, 李国强²

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为了对建筑结构中的高强度钢柱进行抗火设计和验算, 研究了高强度钢柱在高温下的极限承载力数值计算方法。考虑温度对高强度钢材力学性能的影响, 对常温下钢柱极限承载力计算的逆算单元长度法进行了延伸, 编制了高温下高强度钢柱极限承载力计算程序。采用编制的程序对高强度钢柱在高温下的极限承载力进行了计算, 将计算结果与有限元分析结果进行了比较, 发现吻合较好。分析了高强度钢柱截面上残余应力的分布模式, 残余应力大小和柱的初始几何缺陷对极限承载力的影响。研究表明: 延伸的逆算单元长度法可以用于高强度钢柱高温下极限承载力计算, 残余应力的分布模式和大小对高温下高强度钢柱的极限承载力影响很小, 而初始几何缺陷对极限承载力的影响较大。

关键词: 高强钢; 钢柱; 抗火

中图分类号: TU392 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2011)06-0013-06

Numerical Method for Load Bearing Capacity of High Strength Steel Columns at Elevated Temperature

WANG Wei-yong¹, LI Guo-qiang²

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. State Key Lab for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: In order to make fire resistance design of high strength steel columns in building structures, the numerical calculation method on load bearing capacity of high strength steel columns at elevated temperature was investigated. By taking the mechanical property of high strength steel at elevated temperature into consideration, extension was made on the inverse calculation segment length method and the program to compute the load bearing capacity of high strength steel columns at elevated temperature was performed. The program was adopted to compute the load bearing capacity. The results obtained by the program and the finite element analysis were compared and good agreement had been found. The influence of magnitude, distribution mode of residual stress and initial geometry imperfection on ultimate load bearing capacity was analyzed by employing the program. It is shown that the extended method can be used to calculate the load bearing capacity of high strength steel columns at elevated temperature; the magnitude and distribution mode of residual stress had little influence but the geometry imperfection have significant influence on ultimate load bearing capacity.

Key words: high strength steel; steel column; fire resistance

收稿日期: 2011-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(51006320); 教育部高等学校博士学科点科研基金(20090191120032); 重庆市自然科学基金(CSTC, 2010BB4224)

作者简介: 王卫永(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构抗火研究, (E-mail) wwyong200@yahoo.com.cn.

高强度钢具有较高的强度,可有效减轻结构自重,提高结构的抗震性能,在高层建筑结构中得到越来越广泛的应用^[1-4]。钢结构不耐火,无防火保护的结构在火灾下很快失去承载力和稳定性,目前关于高强度钢的抗火研究还不多。李国强等^[5]对高强度螺栓用钢 20MnTiB 进行了高温下的试验研究,得到了屈服强度,极限强度,弹性模量,伸长率和膨胀系数的计算方法。屈立军^[6]对某型 Q420 结构用钢在高温下的强度性能进行试验研究,结果表明,恒载加温比恒温加载钢材的强度要小。Chen^[7]对高强度钢 BISPLATE80 进行了稳态和瞬态试验研究,结果表明高强度钢和普通钢的弹性模量和屈服强度在 22~540℃ 之间时非常相似,温度超过 540℃ 以后差别较大。Chen^[8]使用有限元软件 ABAQUS 研究了高强度箱型和 I 字形钢柱在高温下的强度,并将有限元分析结果和美国、欧洲、澳大利亚规范得出的热轧钢柱在高温下的承载力结果进行了比较,结果发现,使用美国和欧洲规范计算得出的高强度钢柱的承载力结果偏于保守。王卫永等^[9]引入高强度钢高温下的力学性能参数,推导了高强度钢轴心受压柱在高温下的临界应力,进而得到高温下整体稳定系数与临界温度。

本文对常温下钢柱极限承载力计算的逆算单元长度法进行了扩展,编制了高温下高强度钢柱极限承载力计算程序。采用编制的程序对高强度钢柱在高温下的极限承载力进行了计算,将计算结果与有限元分析结果进行了比较并分析了高强度钢柱截面上残余应力的分布模式,残余应力大小和柱的初始几何缺陷对极限承载力的影响。

1 高强钢的高温力学性能

钢材的强度和刚度随着温度的升高会发生变化,目前,高温下描述普通结构钢的力学性能模型非常多,多个国家规范都有相应的规定。高强度钢与普通结构钢相比,化学成分发生了变化,高温下的力学性能也就和普通钢不完全相同。高温下高强度钢的力学性能模型还不多,文中采用 Chen^[7]对高强度钢 BISPLATE 80(屈服强度 690 MPa)的试验结果得出的高强度钢弹性模量和对应残余应变为 0.2% 时的屈服强度。根据试验结果,Chen^[8]给出了一组拟合公式,即:

高强度钢高温下屈服强度:

$$\frac{f_{y,T}}{f_y} = a - \frac{(T-b)^n}{c} \quad (1)$$

式中: $f_{y,T}$ 为温度 T ℃ 时高强度钢材的屈服强度; f_y

为常温下高强度钢的屈服强度;参数 a 、 b 、 c 、 n 的取值见表 1。

高强钢高温下弹性模量:

$$\frac{E_T}{E} = 1.0 - \frac{T-22}{978} \quad (2)$$

式中: E_T 为温度 T ℃ 时高强度钢材的弹性模量; E 为常温下高强度钢的弹性模量。

表 1 屈服强度公式中参数取值表

温度/℃	22 ≤ T < 350	350 ≤ T < 650	650 ≤ T < 1 000
a	1	0.88	0.45
b	22	300	650
c	140	285 000	13
n	0.5	2	0.3

2 高强钢柱极限承载力数值计算方法

常温下钢柱的整体稳定承载力计算可以采用《钢结构设计规范(GB 50017—2003)》^[10]给出的计算公式,该公式是采用逆算单元长度法^[11-12]计算出大量数据拟合得出的。本文通过对常温下逆算单元长度法进行扩展(数值算法),考虑温度对材料力学性能的影响,计算了高强钢柱高温下的极限承载力,并使用有限元分析对计算结果进行了验证。

2.1 高温下的逆算单元长度法

李开禧等^[11-12]采用了逆算单元长度法计算常温下钢压杆的临界力,该方法可以考虑任意的残余应力分布和初始弯曲的影响。中国现行规范中给出的钢柱稳定系数就是采用该方法考虑了不同的残余应力分布模式,将构件划分为 a、b、c、d 4 类,计算了大量的数据,通过对数据进行拟合,得出了临界应力的计算公式。本文对该方法的应用范围进行了延伸,用来计算高强钢柱高温下的极限承载力,考虑温度的影响后,新的计算流程为:

1) 将构件工字型截面划分成若干个单元,计算出每个单元的面积和形心坐标;单元网格划分见图 1。

2) 给定一个荷载 N_0 和温度值 T ,计算材料的弹性模量 E_T 和截面的面积 A 。

3) 给定一个起点的初始转角 θ_0 。

4) 给定一个初始曲率 φ_0 。

5) 按式(1)计算平均应变。

$$\epsilon_0 = \frac{N_0}{E_T A} \quad (1)$$

6) 根据应力应变关系和残余应力分布按式(2)计算截面每个单元的应力 σ_i 。

$$\sigma_i = E_T [\epsilon_0 + \varphi_0 (y_i - y_0)] + \sigma_{ri} \quad (2)$$

7) 根据截面应力按式(3)求出截面各个单元的

合力和弯矩,并求出弹性区面积的面积 A_e 和形心坐标 y_e 。

$$N = \sum_{i=1}^n \sigma_i \Delta A_i; M = \sum_{i=1}^n \sigma_i \Delta A_i y_i \quad (3)$$

8)判断计算出的合力 N 是否和给定的荷载 N_0 相等;若不等,按式(4)对平均应变进行调整,重复5)、6)、7)步。

$$\epsilon'_0 = \epsilon_0 + \frac{N - N_0}{E_T A_e} \quad (4)$$

9)由(4)~(7)得到一个曲率和弯矩的对应关系。

10)让第4)步中的初始曲率增加一个数值,重复5)~9)步,又得到一个曲率弯矩对应关系。

11)重复第10)步,可以得到曲率和弯矩对应关系数据库。

12)给定第1)段起点的曲率 φ_0 为零,给定一个曲率增量得到第1)段终点的曲率 φ_1 ,调用11)步中得到的数据库,得出该曲率对应的弯矩。

13)按式(5)计算第一段的长度。

$$\Delta_1 = \frac{N_0 \eta \theta_0 - \sqrt{(N_0 \eta \theta_0)^2 - 4 N_0 \eta \Delta M_1 (\varphi_0 + 0.5 \varphi_1) / 3}}{2 N_0 \eta (\varphi_0 + 0.5 \varphi_1) / 3} \quad (5)$$

式中 η 为考虑初始弯曲的压力放大系数,按下式计算:

$$\eta = 1 + \frac{\pi}{1000 \theta_0} \quad (6)$$

14)按式(7)计算第1)段终点的转角,若不为0,第2)段起点的曲率即为第1)段终点的曲率,让第2)点起点的曲率再增加一个曲率增量,得到第2)段终点的曲率。

$$\theta_1 = \theta_0 - \frac{1}{2} (\varphi_0 + \varphi_1) \Delta_1 \quad (7)$$

根据11)步中的数据库得到第2)点终点的弯矩;

15)仿照13)步计算第2)段的长度。

16)仿照14)步计算第2)段终点的转角,若不为0,重复14)~17)步,直至第 n 段终点的转角为0。

17)计算第1)段至第 n 段的长度之和,计算结果乘以2即得到第2)步中给定荷载和温度下构件的临界长度。

18)根据长度计算出长细比。

19)重复2)~18)步即可得出不同温度下临界应力和长细比的曲线。

本文编制了程序计算了残余应力分布为图2所示的分布形式,初始弯曲1‰的构件长度,理想弹塑性应力应变关系(如图3所示),不同温度下的临界应力和长细比的关系曲线,如图4所示。

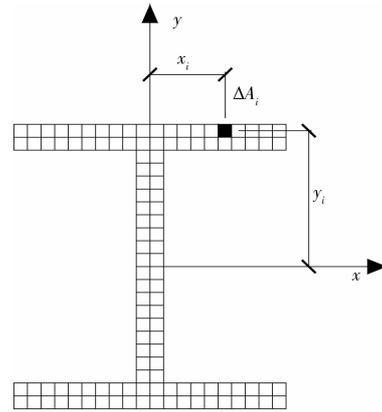


图1 截面单元划分

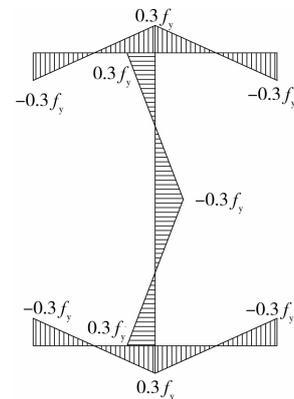


图2 残余应力分布模式

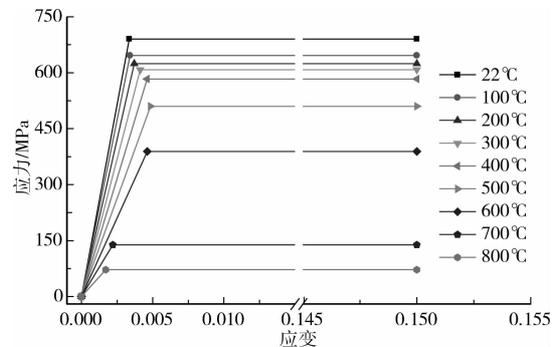


图3 不同温度下应力应变关系曲线

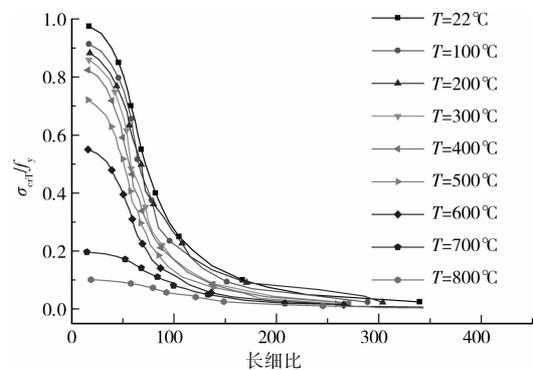


图4 不同温度下高强钢柱的极限承载力

2.2 临界应力法

高强度钢高温下极限承载力计算的临界应力法,文献[9]中已做过研究,为了便于和本文的数值

计算方法进行对比,本文仅给出其结果。

高强度钢柱高温下轴压构件的临界应力:

$$\sigma_{crT} = \frac{1}{2} \{ (1 + e_0) \sigma_{ET} + f_{yT} - \sqrt{[(1 + e_0) \sigma_{ET} + f_{yT}]^2 - 4 f_{yT} \sigma_{ET}} \} \quad (8)$$

式中, σ_{ET} 为高强度钢柱高温下的欧拉临界应力, $\sigma_{ET} = \pi^2 \frac{E_T}{\lambda^2}$; 截面分类按照现行《钢结构设计规范 (GB 50017—2003)》^[10] 中的标准划分, 各类截面构件的初偏心率 e_0 取值如下:

A 类截面: $e_0 = 0.152\bar{\lambda} - 0.014$; B 类截面: $e_0 = 0.300\bar{\lambda} - 0.035$;

C 类截面: $\begin{cases} e_0 = 0.595\bar{\lambda} - 0.094\bar{\lambda} \leq 1.05 \\ e_0 = 0.302\bar{\lambda} + 0.216\bar{\lambda} > 1.05 \end{cases}$;

D 类截面: $\begin{cases} e_0 = 0.915\bar{\lambda} - 0.132\bar{\lambda} \leq 1.05 \\ e_0 = 0.432\bar{\lambda} + 0.375\bar{\lambda} > 1.05 \end{cases}$ 。

上述各式中: $\bar{\lambda} = \lambda/\pi \sqrt{f_y/E}$ 。

2.3 算例和比较

为了对延伸的逆算单元长度法(数值算法)和临界应力法进行互相验证,采用这 2 种方法分别对同 1 个构件进行了计算,并将他们的计算结果进行了比较。

计算算例的截面尺寸为 H200×200×8×12,对数值算法和临界应力法进行比较时,残余应力分布为线性分布,最大值为 0.3 倍屈服强度值,如图 2 所示,试件跨中的初弯曲为 1‰ 长度,计算温度为 200℃ 和 700℃。计算结果见图 5 所示。从图 5 可以看出,数值算法和临界应力法吻合较好。

另外,为了对高强度钢柱与普通结构钢柱的抗火性能进行比较(二者弹性模量随温度变化的比较结果见图 6 所示),采用数值算法分别对高强度钢和普通钢柱在高温下的极限承载力进行了计算,计算结果见图 7 所示。由图 7(a)可知,高强度钢在高温下的稳定系数比普通钢低,由图 7(b)可以看出,高温下当长细比较小时,高强度钢的承载力比普通钢大的多,当长细比较大时,高强度钢的强度优势变得越来越不明显。

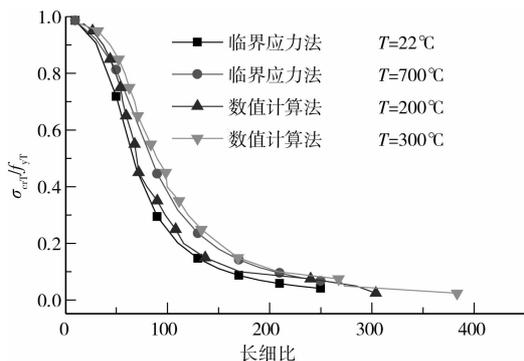


图 5 数值方法与临界应力法比较

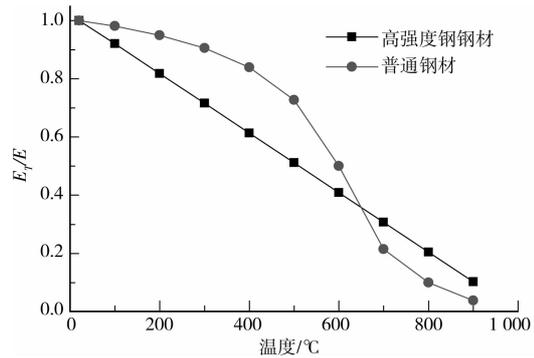
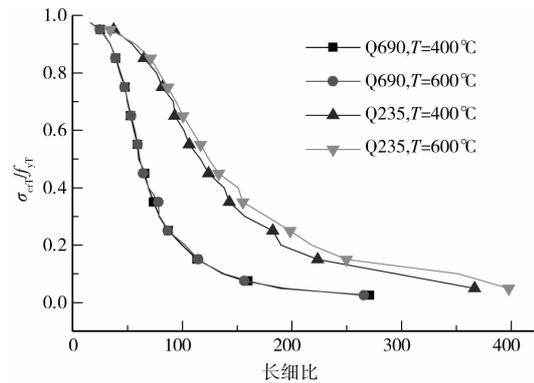
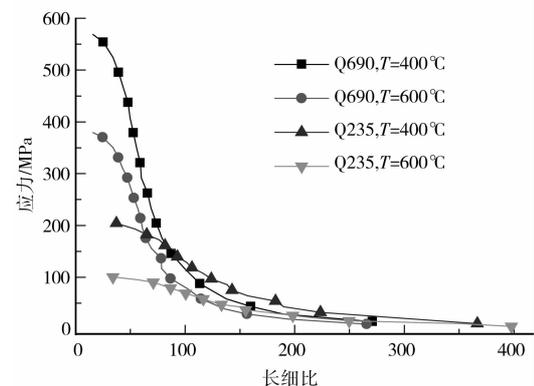


图 6 高强度与普通钢弹性模量的对比



(a) 稳定系数的比较



(b) 极限承载力的比较

图 7 高强度与普通钢的比较

2.4 有限元验证

为了验证本文方法的可靠性,采用 ANSYS 有限元分析对数值计算方法进行了验证,钢柱的单元采用了 beam188 单元类型,应力应变关系采用理想弹塑性模型(如图 3 所示),分析中考虑了 2 个不同的温度,即 300℃ 和 600℃;对强轴考虑了长细比 51 和 102,对弱轴考虑了长细比 75 和 150;也考虑了残余应力和初始弯曲的影响,残余应力取线性分布,最大值为 0.3 倍屈服强度(如图 2 所示),初弯曲取 1‰ 长度。图 8 为有限元分析试件 300℃ 时绕弱轴和 600℃ 绕强轴破坏时高强度钢柱的应力云图,图 9 为有限元分析结果和数值算法计算结果的比较,由于采用数值计算得出的绕强轴和弱轴计算结果非常

接近,图中曲线取二者的平均值,由图 9 可知,二者吻合较好。

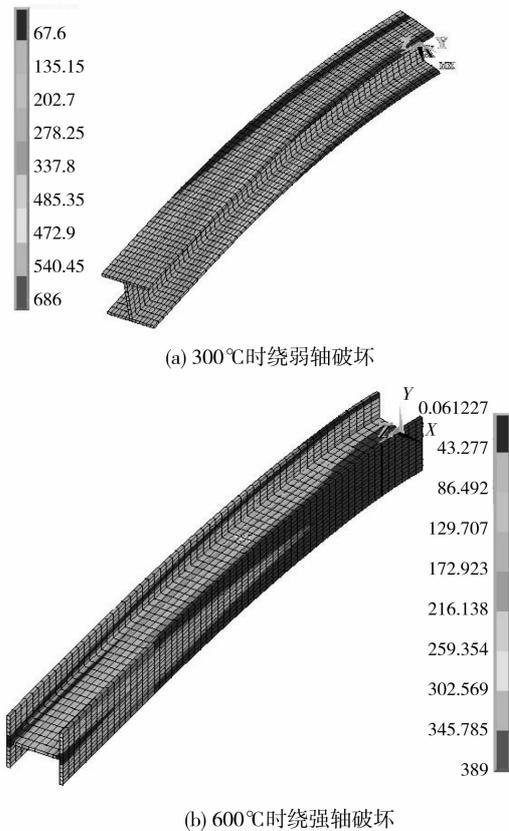


图 8 有限元应力云图

3 影响极限承载力的参数分析

为了得到残余应力和初始弯曲对高强度钢柱极限承载力的影响,采用数值计算方法对不同残余应力和不同初始弯曲的高强度钢柱的极限承载力进行了计算。

3.1 残余应力

分析残余应力大小及模式对极限承载力的影响时,考虑了 2 种不同的残余应力分布模式,每种模式采用了 2 种不同的应力数值,如图 10 所示。高强度

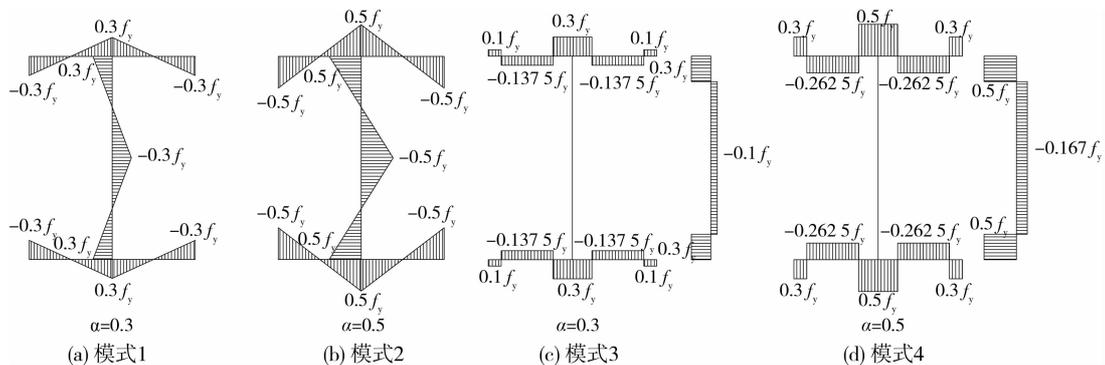


图 10 残余应力分布模式

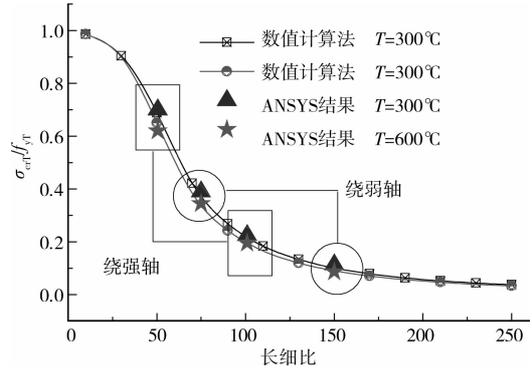


图 9 有限元和临界应力法的比较

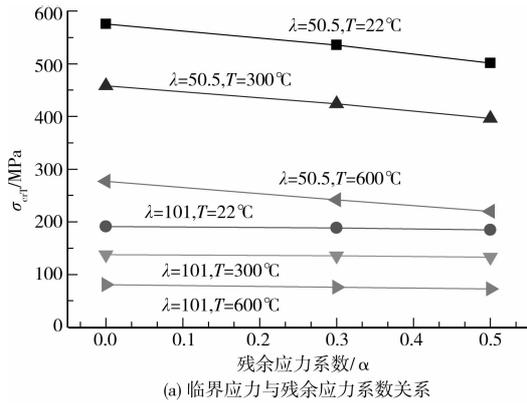
钢柱的尺寸为 $H140 \times 140 \times 10 \times 10$,计算了 3 个温度, 22°C , 300°C 和 600°C ; 2 种长细比 51 和 102; 计算得出的不同残余应力大小和模式下高强度钢柱的极限承载力见图 11 所示。从图 11(a)可以看出,残余应力的大小对高强度钢柱高温下的极限承载力影响不大,长细比越大,影响越小。从图 11(b)中可以看出,残余应力的分布模式对极限承载力影响也不大。

3.2 初始几何缺陷

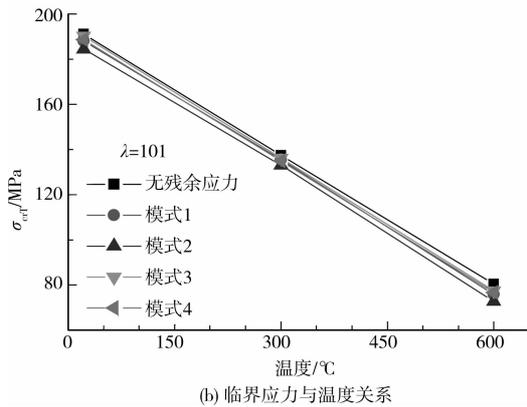
为了得到初始弯曲对高强度钢柱高温下极限承载力的影响,采用数值计算方法对具有不同初始弯曲的钢柱进行了极限承载力计算。考虑了 2 个温度值, 20°C 和 600°C 。高强度钢柱的截面尺寸为: $H140 \times 140 \times 10 \times 10$ 。计算结果见图 12 所示。由图 12 可知,初始弯曲对钢柱极限承载力影响较大,长细比越小越明显。

4 结论

通过对常温下逆算单元长度法进行了延伸并编制了计算程序,使用有限元分析对程序计算结果进行了验证,采用程序计算了高强度钢柱高温下的极限承载力,并分析了残余应力和初始缺陷对高强度钢柱极限承载力的影响,根据研究的结果,可以得到以下几个结论:



(a) 临界应力与残余应力系数关系



(b) 临界应力与温度关系

图 11 残余应力的大小对承载力的影响

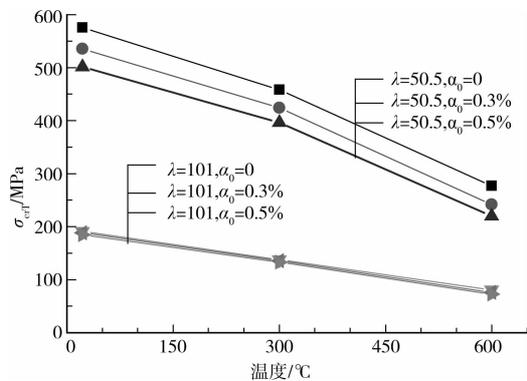


图 12 初始弯曲对承载力的影响

- 1) 延伸的逆算单元长度法可以进行高强度钢高温下极限承载力计算。
- 2) 残余应力的分布模式和大小对高温下高强度钢柱的极限承载力影响很小。
- 3) 初始几何缺陷对极限承载力的影响较大。

参考文献:

[1] MIKI C, HOMMA K, TOMINAGA T. High strength and high performance steels and their use in bridge structures[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2002, 58(1):3-20.

[2] BJORHOVDE R. Development and use of high performance steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60 (3-5): 393-400.

[3] 施刚,石永久,王元清. 超高强度钢材钢结构的工程应用[J]. 建筑钢结构进展,2008,10(4):32-38. SHI GANG, SHI YONG-JIU, WANG YUAN-QING. Engineering application of ultra-high strength steel structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2008,10(4):32-38.

[4] PRIMOZ M, DARKO B. Investigation of high strength steel connections with several bolts in double shear[J]. Journal of Constructional Steel Research 2011, 67(3): 333-347.

[5] LI GUO-QIANG, JIANG SHOU-CHAO, YIN YING-ZHI, et al. Experimental studies on the properties of constructional steel at elevated temperatures[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129 (12): 1717-1721.

[6] 屈立军,李焕群. Q420 钢材高温强度试验研究[J]. 消防科学与技术,2004,23(3):223-225. QU LI-JUN, LI HUAN-QUN. Study on strength of Q420 steel section at elevated temperatures[J]. Fire science and technology, 2004,23(3):223-225.

[7] CHEN J, YOUNG B, UY B. Behaviour of high strength structural steel at elevated temperatures[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE 2006, 132 (12):1948-54.

[8] CHEN J, YOUNG B. Design of high strength steel columns at elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(6): 689-703.

[9] 王卫永,李国强,戴国欣. 轴心受压高强度 H 型钢柱抗火性能[J]. 重庆大学学报,2010,33(10):76-82. WANG WEI-YONG, LI GUO-QIANG, DAI GUO-XIN. Fire resistance performance of high-strength-steel H shaped columns under the axial compression [J]. Journal of Chongqing University, 2010,33(10):76-82.

[10] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.

[11] 李开禧,萧允徽. 逆算单元长度法计算单轴失稳时钢压杆的临界力[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1982 (4) : 26-45.

[12] 李开禧,须宛明. 关于“逆算单元长度法”的改进[J]. 重庆建筑工程学院学报,1989,11(3):37-43. LI KAI-XI, XU WAN-MING. An improvement on “Inverse calculation segment length method” [J]. Journal of Chongqing Institute of Architecture and Engineering, 1989, 11(3):37-43.

(编辑 王秀玲)