

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.11.008

考虑蠕变的约束钢梁抗火性能分析方法

王卫永^{a,b}, 何平召^a

(重庆大学 a 土木工程学院; b 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 高温和荷载共同作用下钢材产生明显的蠕变变形, 对钢结构在火灾下的变形和受力性能产生较大的影响。在约束钢梁抗火性能分析中考虑蠕变的影响, 引入钢材的高温蠕变模型, 通过考虑蠕变产生的钢梁截面应变, 建立考虑钢材高温蠕变影响的约束钢梁分析理论, 并利用 MATLAB 编写了计算机程序。采用该程序计算了火灾下约束钢梁的约束轴力和跨中挠度, 计算结果和试验数据吻合较好。采用验证后的程序进一步分析了蠕变对简支钢梁和约束钢梁抗火性能的影响。研究表明: 提出的分析方法可以准确考虑蠕变对钢梁抗火性能的影响; 蠕变效应对简支钢梁耐火极限影响较小, 而对约束钢梁影响较大。

关键词: 蠕变; 约束钢梁; 抗火性能; 分析方法

中图分类号: TU392

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2017)11-064-08

Approach to analysis fire resistance of restrained steel beams after considering creep effect

WANG Weiyong^{a,b}, HE Pingzhao^a

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R.China)

Abstract: Significant creep deformation occurs on steel with the coaction of high temperature and loading, and the creep has a large effect on the deformation and load bearing capacity of steel beams in fire. In order to consider the effect of creep on the fire resistance performance of restrained steel beams, the high temperature creep model is employed to establish analysis theory on restrained steel beams by considering creep strain in the cross section of steel beam. And a computer program is performed by using MATLAB software. Restrained axial force and deflection of restrained beam under fire are analyzed by the computer program, and good agreement is found between calculation results and test data. The effect of creep on the fire resistance performance of simply supported beams and restrained steel beams is further investigated by employing the validated program. The results show that the proposed approach can accurately consider the effect of creep on the fire resistance performance of steel beams, and creep has a small effect on the fire resistant performance of simply supported beams, but has a large effect on that of restrained beams.

Keywords: creep; restrained steel beam; fire resistance; approach to analysis

收稿日期: 2017-06-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费(CDJZR12200004); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2013JCYJA30010)。

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(CDJZR12200004), Chongqing Science and Technology Commission(CSTC2013JCYJA30010).

作者简介: 王卫永(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构抗火性能研究, (E-mail)wywang@cqu.edu.cn。

试验研究表明^[1-2],钢梁作为建筑结构的主要承重构件,火灾下的承载力和变形对结构安全至关重要。钢材同其他材料一样,都会存在蠕变现象,钢材在常温下的蠕变非常小,通常可以忽略不计。高温下钢材的蠕变非常明显,对火灾下钢梁的结构响应产生较大的影响。国内外进行了较多的钢梁抗火性能研究^[3-4],部分成果还考虑了钢材的高温蠕变。Skowronski 等^[5]通过考虑蠕变的影响,分析了钢梁在火灾下的变形;Kodur 等^[6]建立了钢梁的有限元分析模型,重点分析了蠕变对内力和变形的影响程度;研究发现,考虑蠕变后有限元模拟的结果更接近试验值。Toric 等^[7]通过修正钢材的应力-应变关系曲线近似考虑钢材的高温蠕变对钢梁抗火性能的影响,建立了钢梁的分析模型,使用该模型预测钢梁的响应与试验吻合较好。

在已发表的关于考虑蠕变的钢梁的抗火研究中,主要是采用有限元软件进行分析,还没有基于力学理论的计算方法对考虑蠕变的约束钢梁抗火性能进行研究。Yin 等^[8-9]假设火灾中大变形下钢梁的挠曲线形状与弹性状态相似,提出了确定截面温度的简化计算方法。Li 等^[10]基于弹性挠曲线的假设,建立了不考虑蠕变的约束钢梁理论计算方法。何平召等^[11]对约束梁截面进行了网格划分,在 Li 等^[10]的分析理论上考虑钢梁截面残余应力的影响对计算方法进行了改进。笔者在何平召等^[11]理论的基础上,对计算方法进行了改进,即确定截面应变时,考虑蠕变的贡献,提出了一种约束钢梁抗火性能的计算理论。该理论得出的结果与试验数据对比吻合较好,验证了该计算方法的可靠性。进而采用该方法分析了简支钢梁和约束钢梁的抗火性能,重点分析了蠕变对钢梁的影响。

1 钢材高温力学性能

1.1 应力-应变关系

钢材高温下的本构关系是进行结构抗火分析的前提和基础,已有很多模型给出了高温下钢材的应力-应变关系曲线^[12],比较典型的有 EC3 模型^[13]和 Poh 模型^[14]等。EC3 模型在温度不高时还可以考虑强化的影响,且一定程度上考虑了钢材的蠕变影响。Poh 模型没有考虑蠕变,是基于钢材高温拉伸试验数据提出的,已经被广泛使用。分析中将蠕变单独考虑,因此,采用 Poh 模型更合适。Q345 钢材采用 Poh 模型得到的高温下应力-应变关系曲线如图 1 所示。不同温度下的 Poh 模型与 EC3 模型(考虑应力强化)中应力-应变关系对比如图 2 所示。从图 2 中可以看出,相同温度和应力水平下,EC3 模型得出的应变大于 Poh 模型,这与考虑蠕变的影响有关。

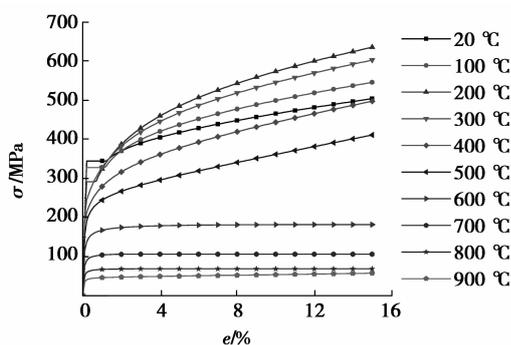


图 1 钢材高温应力应变关系(Poh 模型)

Fig.1 Stress-strain curves of steel (Poh model)

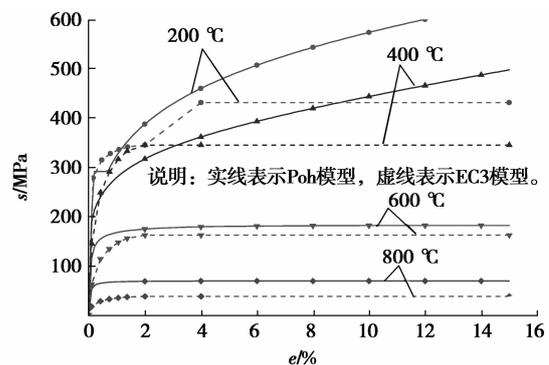


图 2 Poh 和 EC3 两种模型的对比

Fig.2 Comparison between Poh and EC3 model

1.2 蠕变模型和参数

闫守海^[15]对 Q345 钢材在 300~900 °C 之间的温度范围内做了一系列试验研究。比较系统和全面地得到了钢材高温蠕变规律。基于 Norton 蠕变模型,提出了适用的计算参数。蠕变速率表达式为

$$\dot{\epsilon}_{cr} = C_1 \sigma^{C_2} e^{-C_3/T}, \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}_{cr}$ 为蠕变应变率; σ 为应力,Pa; T 为热力学温度,K;对于 Q345 钢材, $C_1 = 4.090 2 \times 10^{-17}$, $C_2 = 2.1$, $C_3 = 10 660$ 。

该模型计算的蠕变应变与试验数据的对比如图 3 所示,计算得到的蠕变应变与试验数据吻合很好,证明

该模型及其参数的可靠性。不同型号钢材的蠕变应变有一定的差异。虽然,蠕变模型及其参数有很多,但还没有一个适用于所有钢材的蠕变模型及其参数。Q345 钢材为国内钢结构常用的钢材型号。文中分析也是对 Q345 钢材的钢梁进行蠕变分析。该蠕变模型的蠕变速率与时间无关,只与所处的温度和应力有关,方便程序编写,分析中的蠕变模型均采用该模型。

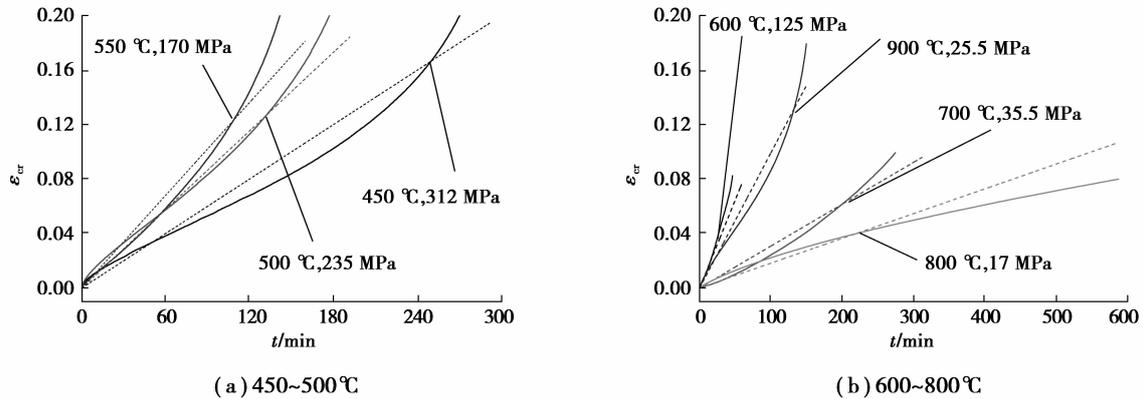


图3 Q345 钢材蠕变模型(虚线)与试验数据(实线)对比

Fig.3 Comparison between creep model (dotted line) and test data (solid line) of Q345 steel

2 考虑蠕变的约束钢梁分析方法

在文献[10-11]计算方法的基础上进行改进,考虑蠕变对约束钢梁抗火性能的影响。图4所示为约束钢梁力学模型,梁两端的轴向约束刚度分别为 K_{a1} 和 K_{a2} 。梁两端的转动约束刚度为 K_r ,梁跨度为 l 。考虑梁截面温度不均匀分布,上翼缘温度 T_t ,腹板及下翼缘温度为 T_b 。把梁在高温下的变形分成2部分,一部分是由于梁截面温度不均匀分布产生的变形,另一部分是由于外力引起的变形。建立分析方法时,钢梁的温度在不均匀分布条件下,考虑蠕变影响后,假设钢梁的截面仍符合平截面假定,蠕变率的计算采用显式计算,将钢梁的受火时间分成若干时间步,在任意一个小的时间步长内,假定温度和应力都保持恒定,采用每个时间步开始时的应力和温度计算此刻的蠕变率。

1)沿截面高度的温差引起的挠曲线方程为

$$f_T(x) = \left(1 - \frac{K_{e,r}}{E_T I / l}\right) \frac{\alpha_s (T_b - T_t)}{2h} (xlx^2)。 \quad (2)$$

截面温度差引起的挠度为

$$\delta_T = \left(1 - \frac{K_{e,r}}{E_T I / l}\right) \frac{\alpha_s (T_b - T_t) l^2}{8h}, \quad (3)$$

式中: $K_{e,r}$ 为梁的等效转动约束刚度,取值为 $k_{e,r} = 1 / (2 / K_r + l / E_T I)$; E_T 为钢材在温度 T 时的弹性模量; I 为钢梁截面的惯性矩; α_s 为钢材热膨胀系数; h 为梁截面高度; x 为计算截面距梁端的距离。

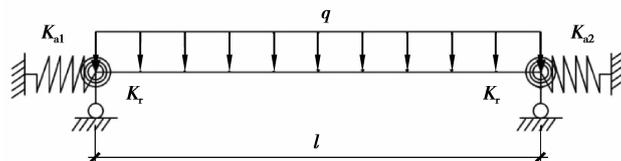


图4 约束钢梁分析模型

Fig.4 Model of the restrained beam

2) 假定约束钢梁在高温下的大变形挠曲线与其在弹性状态下的挠曲线形状一样,计算荷载作用下钢梁的挠度方程 $f_m(x)$ 。钢梁的总挠度方程为

$$f(x) = f_m(x) + f_T(x) \tag{4}$$

为了校核假设的正确性,借助 ANSYS 建立约束钢梁受力分析模型,其跨度取为 5 m,截面为 HN400×200×8×13,梁上作用均布线荷载,考虑几个温度,得到钢梁在各个温度时的变形。图 5 为 ANSYS 计算的约束梁在各个温度下的挠曲线和按文中近似假定方法计算得到的挠曲线比较。从图中可以看出,文中方法计算的钢梁挠度与采用 ANSYS 分析的结果十分吻合,从而验证了文中假设挠曲线的合理性。

3) 假定钢梁在某一时刻荷载引起的跨中挠度值 δ_m (可简便地取上一时刻的计算结果)。

4) 由于梁弯曲和热膨胀,梁端总的水平位移为

$$\Delta l = \alpha_s(T - T_0) - \left(\int_0^l \sqrt{1 + f'(x)^2} dx - l \right), \tag{5}$$

式中: T 为该时刻钢梁的平均温度; T_0 为钢梁初始平均温度。

5) 则梁中附加轴力为

$$N = \Delta l K_{e,a}, \tag{6}$$

式中: $K_{e,a}$ 为约束梁有效轴向刚度,取值为 $k_{e,a} = 1 / (1/K_{a1} + 1/K_{bT} + 1/K_{a2})$, K_{bT} 为梁自身的轴向刚度,当梁的变形很大时,应考虑变形对梁轴向刚度的影响。

6) 分别求出梁端部的曲率 φ_{end} 和跨中曲率 φ_{mid} 。曲率计算公式为

$$\varphi = \varphi_m + \varphi_T = \frac{d^2 f_m(x)}{dx^2} + \left(1 - \frac{K_{e,r}}{E_T I / l} \right) \frac{\alpha_s (T_b - T_t)}{h} \tag{7}$$

当 $x=0$ 时,计算式(7)得到的是 φ_{end} ;当 $x=l/2$ 时,计算式(7)得到的是 φ_{mid} 。

7) 确定梁端弯矩 M_{end} 和跨中弯矩 M_{mid} 。由于不同位置处应力不同,从而蠕变也不同,将截面划分成若干个单元,如图 6 所示。

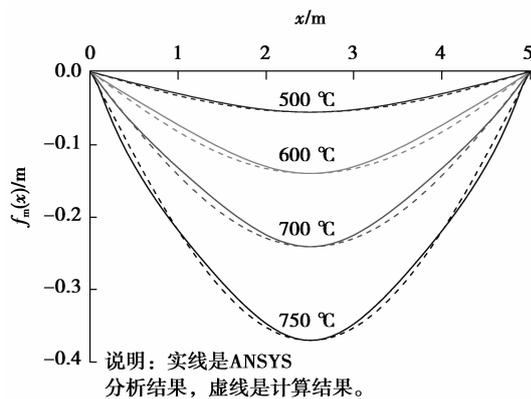


图 5 ANSYS 与近似计算挠曲线比较

Fig.5 Comparison of deflection profiles between ANSYS and approximate calculation

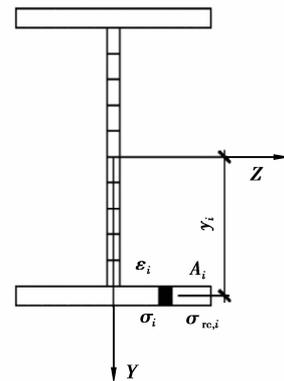


图 6 截面网格划分

Fig.6 Mesh of section

计算弯矩的流程如图 7 所示。流程图中, $\epsilon_{th,i}$ 为截面单元的热膨胀应变, $\epsilon_{th,i} = \alpha_s (T_i - T_{0,i})$, T_i 为第 i 个单元的温度, $T_{0,i}$ 为该单元的初始温度; $\epsilon_{cr,i}$ 为单元的蠕变应变,初始值为零; y_i 为该单元到截面形心的距离。

8) 取约束梁一半的结构,计算约束钢梁大变形下的平衡方程:

$$M_{end} + M_{mid} - M_{eff} + N(\delta_m + \delta_T) = 0, \tag{8}$$

式中, M_{eff} 为一半钢梁上外荷载对梁端的弯矩。

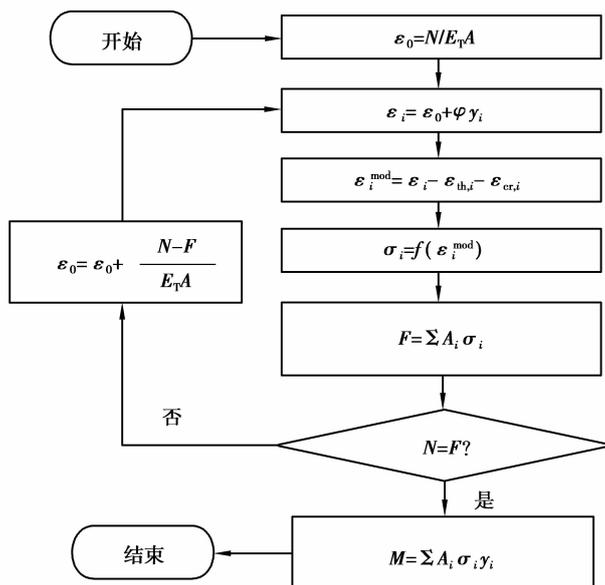


图 7 弯矩计算流程图

Fig.7 Flow chart of moment calculation

如果假定的挠度不能使上述方程平衡,可以增加一个微小增量 $\Delta\delta$ ($\Delta\delta$ 可取 $l/10^4$),重复(3)~(8)步骤,直到满足平衡方程,则该时刻钢梁的挠度为 $\delta = \delta_m + \delta_T$ 。

9) 计算该时刻总的蠕变应变为

$$\epsilon_{cr,i} = \epsilon_{cr,i} + \dot{\epsilon}_{cr,i} dt。 \quad (9)$$

重复上述步骤,计算出下一时刻的挠度、轴力和弯矩。根据以上方法可以得到约束钢梁在升温过程中的挠度 δ 、轴力 N 、端部弯矩 M_{end} 和跨中弯矩 M_{mid} 随时间的变化关系。

3 分析方法的试验验证

为了验证前文的理论分析方法的正确性,将 Liu 等^[1]的试验结果与理论分析方法计算的结果进行对比,采用试件 FUR13,其截面为 UB178×102×19,跨度 2 m,轴向约束 8 kN/mm,作用 2 个集中力,集中力作用点距梁端为 0.3l。根据文中计算方法,利用 MATLAB 编写计算程序,采用的挠曲线方程为

$$f_m(x) = \frac{\delta_m}{\left(\frac{21u}{800} - \frac{33}{1000}\right) l^3} \begin{cases} \frac{x^3}{6} - \frac{21ulx^2}{200} + \frac{21l^2(u-1)x}{200}, & 0 \leq x \leq 0.3l; \\ \left(\frac{3l}{20} - \frac{21ul}{200}\right) x^2 - \left(\frac{3}{20} - \frac{21u}{200}\right) l^2 x + \frac{9l^2}{2000}, & 0.3l \leq x \leq 0.5l. \end{cases} \quad (10)$$

式中, δ_m 为跨中最大挠度值, μ 为转动约束刚度比,表达式为

$$u = \frac{k_r l}{k_r l + 2E_T I}。 \quad (11)$$

图 8 给出了文中分析的结果和试验结果的对比,从图中可见,蠕变效应对钢梁的轴力和位移产生较大的影响,总体而言,考虑蠕变效应后,约束钢梁的火灾反应与试验结果吻合更好。当挠度较小时,程序计算的挠度和轴力与试验吻合都较好,而当挠度较大时,程序计算与试验结果有一定的差异。程序计算结果与试验的差异来源于程序对挠曲线方程的假设。当梁处于弹性状态下,假设的挠曲线与实际一致。然而,当梁端部或者跨中进入塑性后,进入塑性区域钢梁截面的刚度会降低,梁截面刚度沿梁长不再均匀分布,此时不易求得挠曲线精确解。

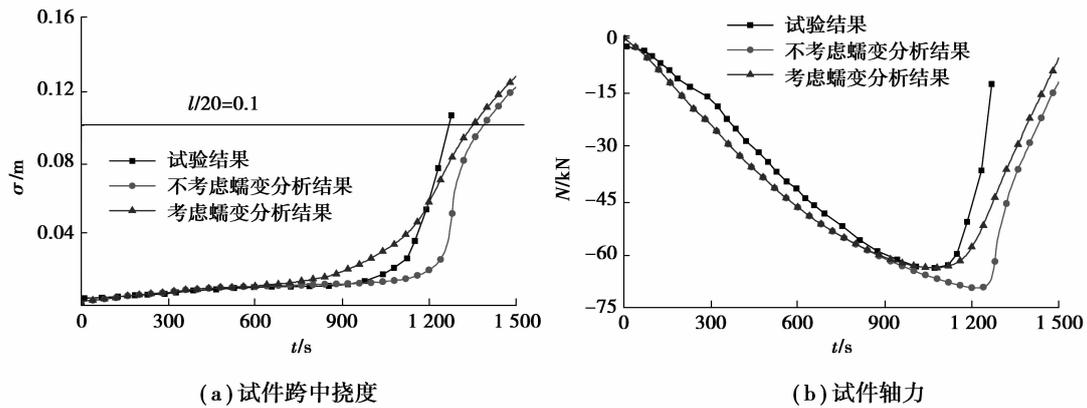


图 8 试验结果与理论计算结果对比

Fig.8 Comparison between test data and the theoretical computation results

从挠度数值来看,试验中梁挠度达到 $l/20$ 的时间为 1 268 s,不考虑蠕变的时间为 1 389 s,相差 9.5%,而考虑蠕变后的时间为 1 351 s,相差为 6.6%。从约束钢梁达到轴力最大值的时间来看,考虑蠕变后时间基本相同,均为 1 072 s,不考虑蠕变的时间为 1 240 s,因此,文中的计算方法可以用于考虑蠕变的约束钢梁的抗火分析。

4 钢梁抗火性能分析

为了进一步分析蠕变对钢梁抗火性能的影响,设计了 2 个算例,简支梁和约束梁各 1 个,采用按文中计算方法编制的分析程序计算了钢梁在火灾下的反应,主要对比是否考虑蠕变对分析结果的影响。

4.1 简支钢梁

设计 1 个简支钢梁,截面为 $HN400 \times 200 \times 8 \times 13$,跨度为 5 m,计算在 ISO-834 标准升温条件下作用均布荷载时的抗火性能。荷载比为 0.45(荷载比定义为实际作用荷载与相同简支梁在常温下屈服时荷载的比值)。根据 ISO-834 标准升温曲线确定构件截面温度,并考虑钢梁截面温度不均匀分布。采用 Q345 型号钢材。均布荷载作用下的挠曲线方程为

$$f_m(x) = \frac{16\delta_m}{(4u-5)l^4}(-x^4 + 2lx^3 - ul^2x^2 + (u-1)l^3x) \quad (12)$$

对于简支梁, $\mu=0$,并且端部弯矩和轴力也始终为零。

采用分析程序得到该简支梁的挠度随时间的变化关系如图 9(a)所示。从图中可以看出,蠕变对简支梁的挠度有一定的影响,考虑蠕变后挠度稍大。但对简支梁的耐火极限影响很小。挠度达到 $l/20$ 的时间均为 920 s 左右。此后,梁挠度迅速增大而破坏,产生这种现象的原因是,简支梁的承载力主要取决于跨中截面抗弯能力。当跨中截面进入塑性,形成塑性铰后挠度迅速增大而破坏。蠕变应变的产生需要在较高的温度和应力下持续一定的时间,而简支梁这个过程比较短,应力应变变得很大,蠕变应变与应力产生的应变相对变小,所以蠕变对其影响就变小。

4.2 约束钢梁

4.2.1 转动约束钢梁

对于与简支梁相同截面、跨度、温度和荷载,具有转动约束刚度为 EI/l 的转动约束钢梁,根据文中计算方法得到的挠度如图 9(b)所示。相对简支梁,转动约束明显提高了耐火极限。考虑与不考虑蠕变在挠度达到 $l/20$ 的时间分别为 1 387 s 和 1 623 s,相差 17%,蠕变对挠度有明显的影响,随着时间增加,对挠度影响越来越明显,考虑蠕变比不考虑蠕变的挠度可大 5.4 倍。当具有转动约束的钢梁的跨中(端部)截面出现塑性铰后,可以依靠端部(跨中)截面继续承载,通过这段时间可以积累一定的蠕变应变,而当端部(跨中)截面也形成塑性铰后挠度迅速增大而破坏。

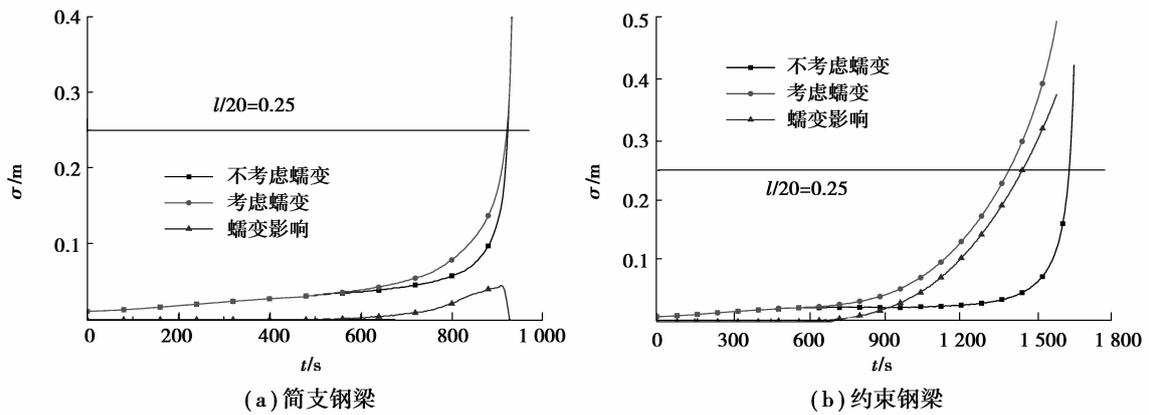


图 9 蠕变对钢梁挠度的影响

Fig.9 Effect of creep on deflection of steel beams

4.2.2 轴向和转动约束钢梁

对于与简支梁相同截面、跨度、温度和荷载,具有轴向约束刚度为 $0.1EA/l$,转动约束刚度为 EI/l 的约束钢梁,得到的挠度和轴力如图 10 所示。图 11 所示为跨中截面蠕变应变随时间的变化。

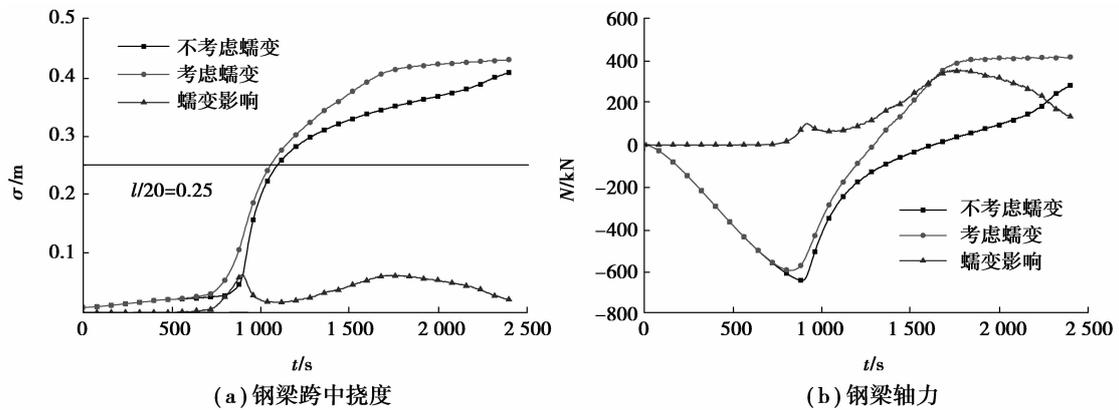


图 10 蠕变对约束钢梁影响

Fig.10 Effect of creep on restrained beam

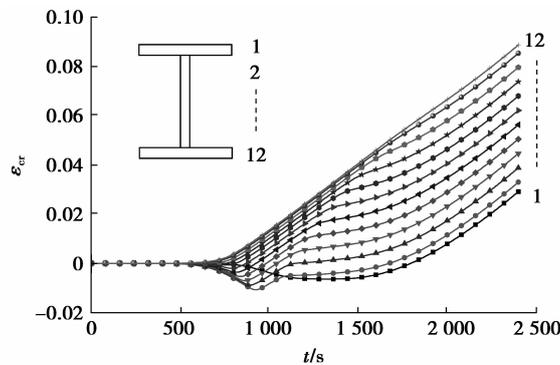


图 11 约束梁跨中截面蠕变应变

Fig.11 Creep strain in mid-span section of restrained beam

从图 10 可以看出,蠕变对轴向和转动约束钢梁也有明显的影响。考虑蠕变后挠度增大,最大轴向压力减小。不考虑蠕变计算得到挠度达到 $l/20$ 的时间为 1 096 s,而考虑蠕变的时间为 1 059 s,均低于相同条件的转动约束钢梁,这是由于轴向约束使梁内产生了不利的轴压力(正为拉,负为压),使梁提早进入屈服阶段。

此时的压缩蠕变占较大比例,如图 11 所示。但在挠度达到 $l/20$ 后,轴压力逐渐减小最后变为有利的轴拉力,出现悬链线效应,约束梁并没有迅速破坏。此时蠕变应变逐渐由压缩变成拉伸。因此,蠕变对挠度和轴力的影响在约 900 s 后较大,随后逐渐又变小,在 1 250 s 左右又开始增加。蠕变对其影响没有转动约束钢梁大,考虑蠕变比不考虑蠕变的挠度最大值大 1.3 倍。

5 结 论

考虑蠕变影响后,对简支钢梁和约束钢梁进行抗火性能分析,得到如下结论。

- 1) 蠕变对简支钢梁在火灾下的挠度虽有一定的影响,但对耐火极限影响不大。
- 2) 蠕变对约束钢梁的火灾响应有明显的影 响,对具有转动约束的钢梁影响最大。
- 3) 具有轴向约束的钢梁,由于约束轴力的存在,蠕变影响较小。
- 4) 转动约束对钢梁抗火性能具有有利作用,轴向约束产生的压力对钢梁抗火性能不利,产生的拉力对钢梁抗火性能有利。

参考文献:

- [1] Liu T C H, Fahad M K, Davies J M. Experimental investigation of behavior of axially restrained steel beams in fire[J]. Journal of Constructional Steel Research,2002,58(9):1211-1230.
- [2] Li G Q, Guo S X. Experiment on restrained steel beams subjected to heating and cooling[J]. Journal of Constructional Steel Research,2008,64(3):268-274.
- [3] 李国强,吴波,韩林海.结构抗火研究进展与趋势[J].建筑钢结构进展,2006,8(1):1-13.
LI Guoqiang, WU Bo, HAN Linhai. Development of the research on fire-resistance of structures[J]. Progress in steel Building Structures,2006,8(1):1-13.(in Chinese)
- [4] 李国强,吴波,蒋首超.工程结构抗火研究进展与建议[J].建筑钢结构进展,2010,12(5):13-18.
LI Guoqiang, WU Bo, JIANG Shouchao. State-of -the-art and suggestions of research on fire-resistance of structures[J]. Progress in steel Building Structures,2010,12(5):13-18.(in Chinese)
- [5] Skowronski W. A study of the steel beam deformation during fire[J]. Building and Environment,1988,23(2):159-167.
- [6] Kodur V K R, Dwaikat M M S. Effect of high temperature creep on the fire response of restrained steel beams[J]. Materials and Structures,2010,63:1327-1341.
- [7] Toric N, Harapin A, Boko I. Experimental verification of a newly developed implicit creep model for steel structures exposed to fire[J]. Engineering Structures,2013,57:116-124.
- [8] Yin Y Z, Wang Y C. Analysis of catenary action in steel beams using a simplified hand calculation method, Part 1: theory and validation for uniform temperature distribution[J]. Journal of Constructional Steel Research,2005,61(2):183-211.
- [9] Yin Y Z, Wang Y C. Analysis of catenary action in steel beams using a simplified hand calculation method, Part 2: validation for non-uniform temperature distribution[J]. Journal of Constructional Steel Research,2005,61(2):213-234.
- [10] Li G Q, Guo S X. Analysis of restrained steel beams subjected to heating and cooling pare 1: Theory[J]. Steel and Composite Structures,2008,8(1):1-18.
- [11] 何平召,王卫永.约束高强度 Q460 钢梁抗火性能研究[J].土木建筑与环境工程,2015,37(2):52-59.
HE Pingzhao, WANG Weiyong. Fire resistance study on restrained high strength Q460 steel Beams[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering,2015,37(2):52-59.(in Chinese)
- [12] 李国强,韩林海,楼国彪.钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.
LI Guoqiang, HAN Linhai, LOU Guobiao. Fire resistance design of steel structures and steel-concrete composite structures[M]. Beijing: China Building Industry Press,2006.(in Chinese)
- [13] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1.1: General rules and rules for buildings[S]. BS EN1993-1-1, Brussels, Belgium,2005.
- [14] Poh K W. Stress-strain-temperature relationship for structural steel[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2001,13:371-379.
- [15] 闫守海.钢材高温蠕变性能试验研究[D].重庆:重庆大学,2015.
YAN Shouhai. Experimental study on creep behavior in steel at elevated temperature[D]. Chongqing University,2015. (in Chinese)