

# H 形截面钢构件绕弱轴抗弯承载力

程 欣<sup>1,2</sup>, 陈以一<sup>1,2</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 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 对 H 形截面钢构件绕弱轴弯曲的性能进行研究, 考虑了抗弯承载力与板件宽厚比之间的关系. 基于经实验校准的非线性有限元模型, 模拟了不同翼缘和腹板宽厚比组配的 H 形截面钢构件绕弱轴弯曲的全过程, 并对破坏模式进行了机理分析. 研究发现, 对于工程中常用的 H 形截面钢构件, 极限前性能主要由翼缘宽厚比决定; 极限后翼缘和腹板之间存在显著的相关作用. 最后, 给出了绕弱轴弯曲时可达塑性抗弯能力的 H 形截面钢构件宽厚比上限值, 并提出了有效塑性宽度计算法计算 H 形截面钢构件绕弱轴弯曲的极限抗弯承载力.

**关键词:** 局部屈曲; 翼缘腹板相关性; 绕弱轴弯曲; 极限承载力; 截面分类

**中图分类号:** TU391

**文献标志码:** A

## Moment Resistance of H-section Steel Members Bent About Minor Axis

CHENG Xin<sup>1,2</sup>, CHEN Yi<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The behavior of H-section steel members bent about the minor-axis was thoroughly investigated by taking the relationship of the plate element slendernesses with the flexural resistance into consideration. A finite element analysis was conducted to investigate the whole loading process behavior of H-section steel members composed of different combinations of flange and web slendernesses bent about their minor axis, where the failure mechanism was derived from the stress development curves. It is found that the behavior of such members in pre-ultimate stage is mainly affected by the flange width-to-thickness ratio; while the behavior of such members in the post-ultimate stage is significantly affected by the flange-web interaction. In addition, the proposed slenderness limit for H-section

members was put forward, which could attain their full plastic moment resistance when they being bent about the minor-axis. Finally, the effective plastic width method for calculating ultimate strength was put forward.

**Key words:** local buckling; flange-web interactive effect; minor axis bending; ultimate strength; cross-section classification

由于 H 形截面压弯构件承受双向弯矩作用受力性能的复杂性, 目前国内外对该类构件双向作用的实验及理论研究都很匮乏, 阻碍了工程应用中正确考虑双向弯曲作用. 双向弯矩作用下, 两主轴方向存在强度和刚度的相互影响, 构件一个主轴方向发生屈服或屈曲的同时会降低另一主轴方向的强度和刚度. 而研究该相互作用的重要基础为绕单一主轴方向弯曲性能的研究.

目前, 国内外对 H 形截面钢构件的研究主要集中在绕强轴弯曲的情况, 对绕弱轴弯曲的研究非常有限. 且已有研究大部分从单板分析入手, 即假定翼缘是三边简支一边自由的单板, 而腹板是四边简支的单板, 没考虑翼缘和腹板的相关作用. 基于按现有规范划定的 IV 类 H 形截面在绕弱轴弯曲时具有一定塑性发展能力的发现, Bambach 等<sup>[1-2]</sup>对三边简支一边自由的单板承受不同应力梯度作用的情况进行了实验研究, 在此基础上采用了三种方法计算 H 形截面的极限承载力, 包括有效弹性宽度法, 有效塑性宽度法以及屈服绞线法. 其研究结果表明了现有规范过于保守地估计了 H 形截面绕弱轴弯曲的抗弯承载力. 然而他们没有从截面分类的角度处理问题, 改进的计算方法操作较为复杂, 且只适用于按现有规范划定的 IV 类截面. 为了得到双向压弯作用下合理的实用化设计方法, 进行 H 形截面钢构件绕弱轴

收稿日期: 2012-12-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51038008)

第一作者: 程 欣(1986—), 女, 博士生, 主要研究方向为钢结构抗震. E-mail: xcheng0309@gmail.com

通讯作者: 陈以一(1955—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为钢结构组合结构等. E-mail: yiyichen@tongji.edu.cn

弯曲的研究是非常必要的。

截面分类是大多数钢结构设计规范的基础,不同的截面类别对应着不同的设计方法。例如在 EC3<sup>[3-4]</sup>中,I类截面构件组成的结构体系可进行塑性设计,II类截面可利用塑性承载力,III类截面采用弹性设计,IV类截面采用有效宽度法。国内外钢结构设计规范,如 EC3,AIJ<sup>[5]</sup>和 GB50017<sup>[6]</sup>,对截面分类的依据是绕强轴弯曲的抗弯承载力和转动能力与板件宽厚比的关系。然而 H 形截面钢构件绕不同主轴弯曲时,应力分布形式不同,抗弯承载力和转动能力与板件宽厚比的关系也存在较大的差异性。因此现行规范的截面分类准则不一定适用于绕弱轴弯曲的情况<sup>[7]</sup>,而不合适的截面分类准则会导致不合适的承载力计算结果。因此,为了保证结构的安全性,提高结构的经济性,有必要对 H 形钢构件绕弱轴弯曲的情况进行分析,提出合适的极限承载力计算方法。

本文通过一系列参数分析,考察了不同翼缘和腹板宽厚比组配情况的 H 形截面钢构件绕弱轴弯曲的弹塑性局部屈曲发展全过程。对翼缘和腹板相关作用在全过程的影响进行了机理分析。根据截面分类的基本定义,给出了针对绕弱轴弯曲的 II 类 H 形截面宽厚比的上限值;并提出了有效塑性宽度法计算 H 形截面钢构件绕弱轴弯曲的极限抗弯承载力。

## 1 参数分析

### 1.1 有限元模型

本文采用通用软件 ABAQUS 模拟 H 形截面悬臂构件绕弱轴弯曲的非线性行为见图 1a,图中  $L$  为构件长度, $\Delta$  为构件柱顶水平位移, $\theta$  为构件弦转角( $\theta=\Delta/L$ ), $V$  为水平力, $M$  为柱底截面弯矩( $M=VL$ ), $w$  为竖向变形。建模时选用 S4R 单元(4 节点四边形有限薄膜应变线性缩减积分壳单元)。采用实验结果对有限元模型进行校验时材料强度取拉伸实验实测值;参数分析时采用屈服强度  $f_y=345$  MPa,钢材取双折线模型,其中弹性模量  $E=2.06\times 10^5$  MPa,强化段切线模量  $E_h=E/100=2.06\times 10^3$  MPa,泊松比 0.3。有限元模型的边界条件和单元划分情况见图 1b。图中, $u_x, u_y, u_z$  分别为  $x, y, z$  方向上的位移, $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  分别为  $x, y, z$  方向上的转角。采用构件特征值屈曲的一阶屈曲模态作为初始几何缺陷模态,局部鼓曲峰值取为  $h/500$ 。H 形截面尺寸的

定义见图 1c,图中  $h$  为截面高, $b$  为截面宽, $h_w$  为腹板净高, $b_f$  为单边翼缘宽, $t_w$  为腹板厚度, $t_f$  为翼缘厚度。

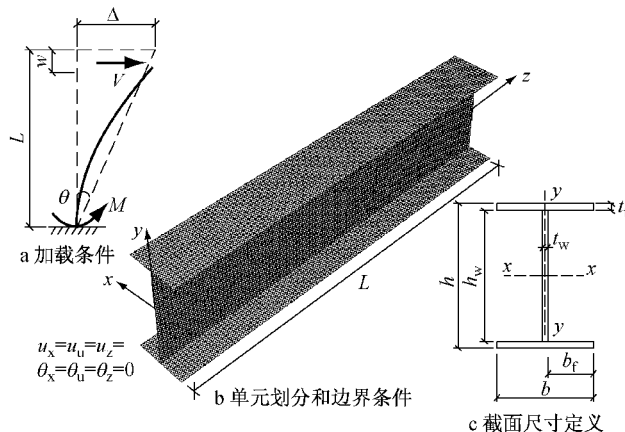


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

本文的主要研究对象为低多层住宅结构的框架柱无轴压力作用的特殊情况,研究焦点为框架柱两端可能形成的“铰区”的性能,不考虑构件平面外弯扭失稳的影响。框架柱的受力性能与等效悬臂柱受力性能一致,因此选取半结构悬臂构件进行实验及参数分析。试件高  $L=1\ 500$  mm,约为普通住宅层高的一半。

### 1.2 模型校核

同济大学钢与轻型结构研究室完成了一系列 H 形截面悬臂钢构件绕弱轴压弯的实验<sup>[8]</sup>,试件的主要参数见表 1。表中, $n$  为轴压比, $n=N/Af_y$ ,其中, $N$  为轴力, $A$  为截面面积。根据 1.1 节的建模方法,采用的材料参数是试件材料拉伸的实测值(表 2)。表中, $f_u$  为钢材极限强度。图 2 显示了各试件的有限元计算结果与实验弯矩-转角曲线的包络线的对比,可以发现有限元结果对实验结果模拟很好。说明该模型可用于 H 形截面钢构件绕弱轴压弯的参数分析。因为绕弱轴弯曲是绕弱轴压弯的特殊情况,该模型同样可用于对 H 形截面梁绕弱轴弯曲的情况进行参数分析。

表 1 试件主要参数

Tab.1 Basic parameters of the specimens

试件编号	$h\times b\times t_w\times t_f/(mm\times mm\times mm\times mm)$	$n$
W-H1-0.2	300×200×6×4	0.17
W-H2-0.2	350×150×4×6	0.17
W-H3-0.2	350×175×4×4	0.14
W-H4-0.2	350×200×4×6	0.17
W-H5-0.2	300×200×4×6	0.18
W-H6-0.2	300×150×4×6	0.17

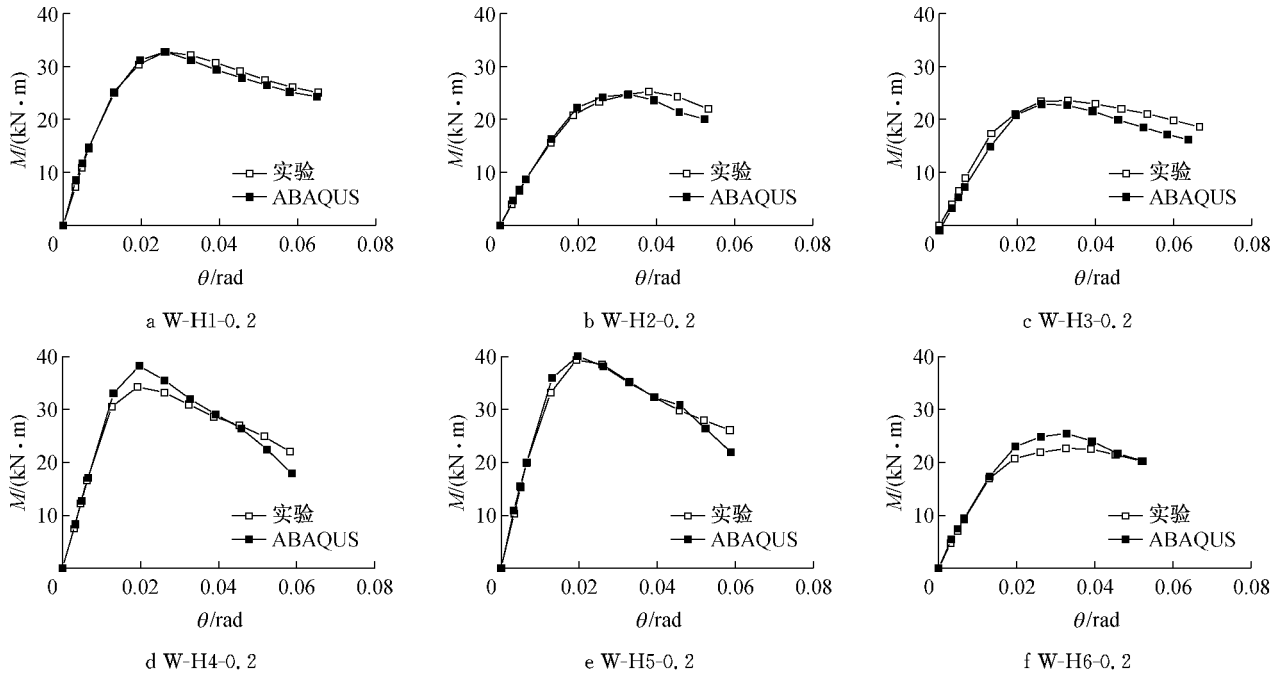
图2 ABAQUS和实验  $M-\theta$  曲线对比结果Fig.2 Comparison of  $M-\theta$  curves between ABAQUS and experiments

表2 实测材料参数

Tab.2 Measured material properties of steel plates

名义板厚/mm	实测板厚/mm	$f_y/\text{MPa}$	$f_u/\text{MPa}$	$E/\text{MPa}$
4	4.13	479	567	$2.01 \times 10^5$
6	5.84	349	530	$1.97 \times 10^5$

### 1.3 参数范围

本文固定翼缘宽度( $b$ )和腹板高度( $h$ ),通过变化翼缘厚度( $t_f$ )和腹板厚度( $t_w$ )来实现翼缘和腹板宽厚比的变化.其中  $b=200\text{ mm}$ ,  $h=300\text{ mm}$ ,  $L=1\,500\text{ mm}$ .定义翼缘宽厚比  $r_f = \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{f_{yf}}{235}}$ ,腹板宽厚

比  $r_w = \frac{h}{t_w} \sqrt{\frac{f_{yw}}{235}}$ ,其中  $f_{yf}$ 和  $f_{yw}$ 分别为翼缘和腹板的屈服强度.  $r_f$ 取值范围为  $10 \sim 40$ ,隔3取,共11个值;  $r_w$ 取为  $30, 90, 150$ .将  $r_f$ 和  $r_w$ 组合,共得到33个构件,涵盖了实际工程中可能出现的大部分情况.各模型以  $r_w-r_f$ 命名,如  $90-30$ 表示  $r_w=90$ ,  $r_f=30$ 的构件.

在本文中,屈服弯矩  $M_e = W_e \cdot f_y$ ,其中  $W_e$ 为绕弱轴的弹性抗弯模量;全截面塑性弯矩  $M_p = W_p \cdot f_y$ ,  $W_p$ 为绕弱轴的全截面塑性模量;屈服位移  $\Delta_y = M_e L^2 / 3EI$ ,屈服转角  $\theta_y = M_e L / 3EI$ .

## 2 破坏机理分析

构件的破坏机理可从翼缘和腹板的平均应力发

展全过程来探究.平均应力指的是板件(翼缘和腹板)沿厚度方向内外表面应力的平均值.应力发展图可显示局部屈曲的发生时刻.屈曲前,受压板件的压应力沿板件厚度方向基本相同.屈曲后,板件的凸起面受到拉伸将会停止增长压应变并产生增量拉应变,对应着该处停止增长压应力产生增量拉应力;板件的凹起面则会继续增长压应变,对应着该处压应力继续增长或保持不变.即屈曲后板件平均应力下降,平均压应力的减小将导致抗弯承载力的下降.因为平均应力是对弯矩有实质贡献的应力,故局部屈曲的发生导致极限抗弯承载力的到达.

图3显示了构件  $90-13, 90-31$ 和  $150-31$ 的翼缘和腹板在  $\theta/\theta_y$ 各整数加载级的平均应力.图中,  $\sigma_f$ ,  $\sigma_w$ 分别为翼缘和腹板的平均应力.图中的  $\sigma_f, \sigma_w$ 是独立的,在每一个分图中不构成坐标系.这三个构件翼缘和腹板宽厚比两两相同,相互比较可体现翼缘和腹板宽厚比对构件性能的影响.可观察到,各构件的屈曲发生时刻所在的加载级分别为:  $90-13, \theta/\theta_y=9$ ;  $90-31, \theta/\theta_y=2$ ;  $150-31, \theta/\theta_y=2$ .构件性能以局部屈曲发生时刻为界,分为屈曲前和屈曲后两阶段.由于局部屈曲的发生对应着极限承载力的达到,这两个阶段又可称为极限前和极限后.

极限前又包括屈服前和屈服至极限前两段.屈服前(各构件  $\theta/\theta_y=1$ 之前的曲线),翼缘上的应力沿宽度方向呈线性分布.屈服至极限前(如  $90-13$ 的  $2 \sim 9$ 级,  $90-31$ 和  $150-31$ 的第2级),翼缘应力呈现的

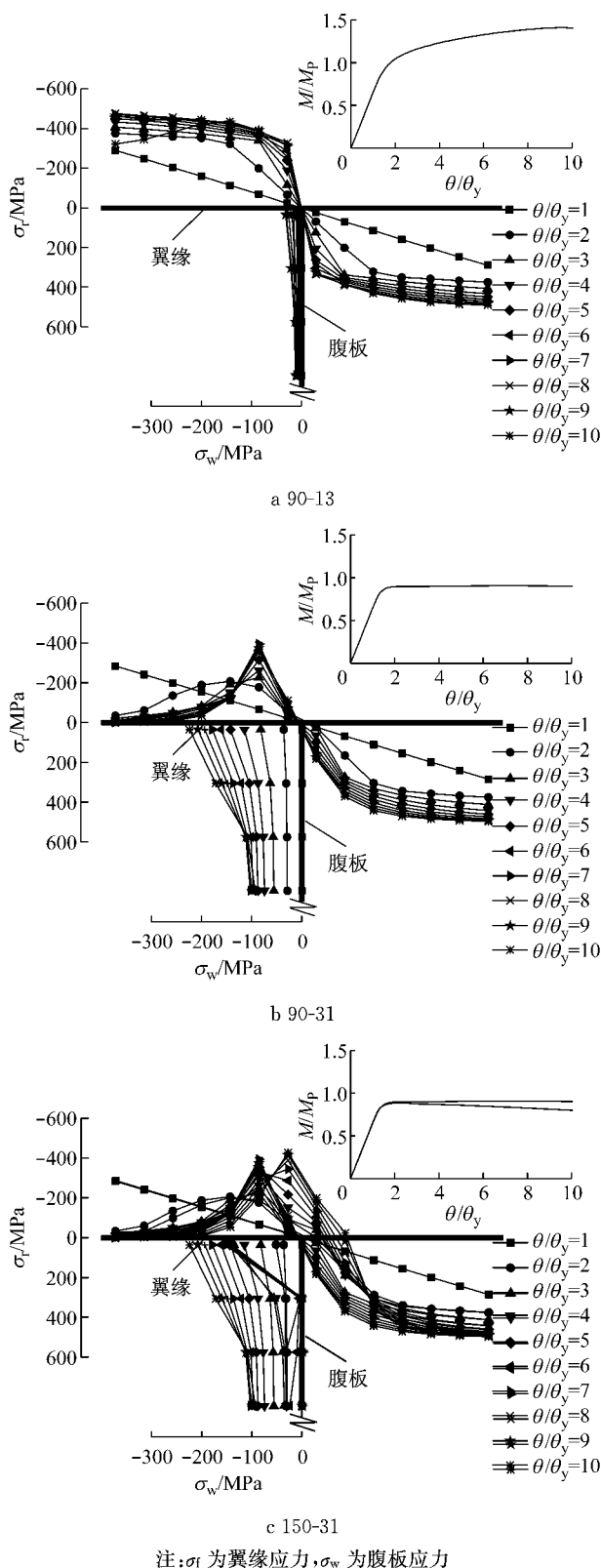


图3 应力发展图

Fig.3 Stress distribution development process

是塑性从边缘往中部扩展的过程. 此阶段伴随着构件刚度的下降, 但承载力保持增长. 当塑性发展到一定程度时, 受压翼缘发生屈曲, 此时达到极限承载力. 可以发现翼缘宽厚比对屈曲发生时刻影响很大,

翼缘宽厚比越大, 屈曲越早发生, 极限承载力越小. 比如 90-13 和 90-31, 两者腹板宽厚比相同, 因为前者的翼缘宽厚比远小于后者, 前者屈曲发生时刻要晚于后者, 而极限承载力高于后者. 屈曲前腹板的平均应力始终为 0, 说明屈曲前, 腹板对构件的性能影响较小, 而翼缘宽厚比是构件性能的主要影响因素.

极限后(如 90-13 的 10 级, 90-31 和 150-31 的 3~10 级), 受压翼缘的应力分布形式基本保持不变(不随外载的增长而变化), 应力图可分为翼缘边缘鼓曲段和近腹板段. 翼缘鼓曲段上的平均压应力几乎为 0, 可认为该段屈曲后退出工作; 而近腹板段一直能保持一定的应力, 可认为是有效宽度, 这是在屈曲后构件能维持一定的抗弯承载力的主要原因.

从翼缘和腹板的相关性出发可看到, 90-31 构件腹板宽厚比较小, 腹板始终没有发生鼓曲. 受压翼缘屈曲后平均压应力减小; 受拉翼缘保持挺直, 其上拉应力每级仍略有增长. 为保持力的平衡, 腹板上不断作用新增压应力, 该应力沿腹板高度方向均匀分布. 屈曲后承载力几乎无退化, 显示了腹板对翼缘良好的支撑作用. 构件 150-31, 腹板较为薄柔, 腹板在翼缘屈曲变形的带动下发生鼓曲. 腹板屈曲后, 其上平均压应力减小, 腹板对弯矩几乎无贡献. 为保持力的平衡, 受拉翼缘靠近腹板的部分产生压应力. 随着压应力向受拉翼缘的扩展, 承载力不断退化. 显示了腹板对翼缘的支撑作用要明显弱于 90-31 构件. 可得出结论, 翼缘和相关作用对构件屈曲后性能有显著影响.

### 3 极限承载力分析

#### 3.1 极限承载力有限元计算结果

提取各构件的弯矩峰值( $M_{\max}$ )作为构件的极限抗弯承载力( $M_u$ ), 分别除以屈服弯矩( $M_e$ )和全截面塑性弯矩( $M_p$ )后列于图 4 中. 图 4 中圆点是文献[9]中绕弱轴纯弯的实验结果, 与有限元计算结果相吻合, 进一步说明了有限元模型的正确性. 可以看到翼缘宽厚比对构件极限承载力影响很大, 翼缘越薄柔, 构件极限承载力越低; 而腹板宽厚比对构件极限承载力影响很小. 这与第 2 章的分析相契合.

#### 3.2 截面分类讨论

当构件受弯时, 依其力学性能的不同, 一般可以划分为如下 4 种类型: I 类截面能够形成具有充分转动能力的“塑性铰”( $M_u \geq M_p$ ); II 类截面可以达到塑性承载强度但塑性变形量较小( $M_u \geq M_p$ ); III 类截面仅能达到边缘屈服强度( $M_e \leq M_u < M_p$ ); IV 类截

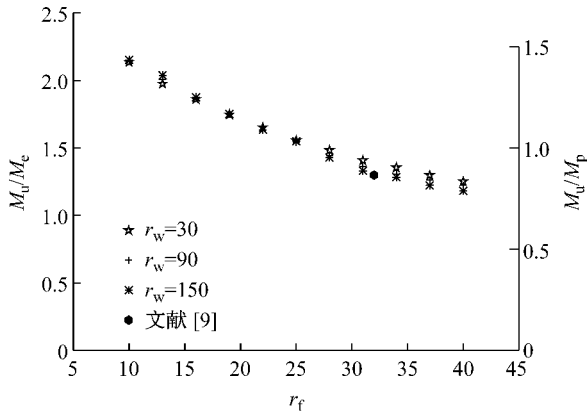


图4 ABAQUS 极限承载力结果

Fig.4 Ultimate strength obtained from ABAQUS

面在最大名义应力达到屈服之前发生局部失稳 ( $M_u < M_e$ ). 由图 5 可知, 所有构件的  $M_u/M_e$  均大于 1, 说明所选参数分析范围内所有构件均不属于 IV 类截面构件. 当  $r_f \leq 25$  时,  $M_u/M_p$  均大于 1; 当  $r_f > 25$  时,  $M_u/M_p$  均小于 1, 说明在所选参数范围内,  $r_f = 25$  是 II 类截面的上限值.

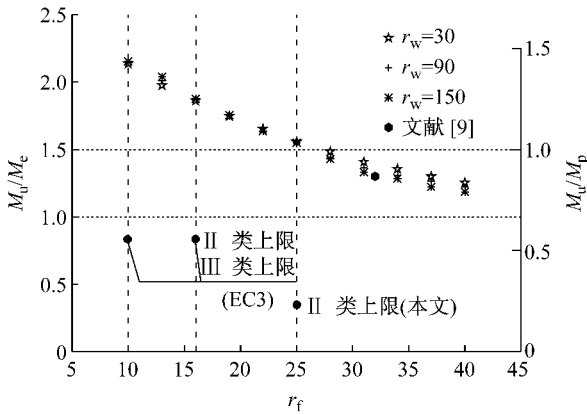


图5 截面分类结果比较

Fig.5 Comparison of cross-section classification

图 5 还显示了 EC3 规范给出的 II 类和 III 类 H 形截面梁的翼缘宽厚比上限值, 分别为 10 和 16. 与计算结果差异较大, 说明现行规范对 H 形截面钢构件绕弱轴弯曲的截面分类准则过于保守.

### 3.3 极限承载力计算方法

由图 3 可知, 屈曲后, 根据应力分布形式的不同, 受压翼缘可分为翼缘边缘鼓曲段和近腹板段两段, 边缘鼓曲段可认为退出工作, 对抗弯无贡献; 近腹板段可认为是有效宽度段. 由 3.2 节的结果,  $r_f = 25$  为 II 类截面的上限值, 不妨认为翼缘有效宽度  $b_e$ .  $b_e = \min \left\{ b_f, 25t_f \sqrt{\frac{235}{f_{yf}}} \right\}$ , 而腹板全部有效, 有效截面分布如图 6b 所示, 图 6a 为毛截面,  $b_{ef}$  为受压翼缘有

效宽度.

假定承载力达到极限状态时, 有效截面上的应力分布形式如图 6c 所示, 对翼缘上的应力积分即可得到极限抗弯承载力, 如下:

$$M_u = \frac{b_e^2 t_f f_{yf}}{2} \quad (1)$$

注意到, 该计算方法适用于各类 H 形截面构件 (I~IV 类截面).

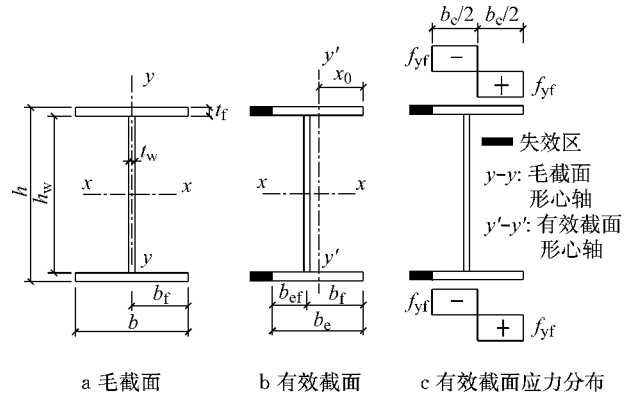


图6 塑性有效宽度法

Fig.6 Effective plastic width method

图 7 比较了本文提出的有效塑性宽度法计算结果, 根据 EC3 的设计方法得到的计算结果, 以及文献[9]提出的两种有效塑性宽度法得到的极限承载力. 比较结果显示本文提出的方法大大改进了规范计算的准确性.

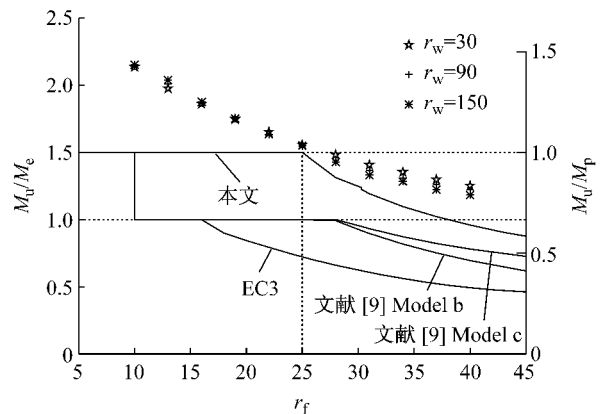


图7 极限承载力计算结果比较

Fig.7 Ultimate strength results

## 4 结论

本文建立了准确可靠的 ABAQUS 有限元模型, 对 33 个不同翼缘腹板宽厚比组配的 H 形截面悬臂

(下转第 90 页)