

# 冷弯薄壁槽钢轴压屈曲承载力设计方法比较

黄丽华, 杨文斌, 徐 嘉

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 在各国轻钢结构设计规范中, 冷弯薄壁型钢轴压承载力的计算主要基于有效宽度法和直接强度法。本文通过研究美国钢铁协会(AISI)规范和中国冷弯钢规范(GB 50018—2014 征求意见稿)中有效宽度法和直接强度法的计算公式, 以 76 根常规槽形截面试验杆件为对象, 对比基于不同计算方法得到的轴压承载力, 分析两国规范中基于两种算法计算结果的精度、可靠性和差异性。计算结果表明: 中国规范(意见稿)的直接强度法和美国规范的有效宽度法计算结果和试件试验承载力更接近, 中国规范(意见稿)的有效宽度法的计算结果偏保守, 而美国规范的直接强度法计算的承载力偏危险且离散性最大。

**关键词:** 冷弯薄壁型钢; 轴压承载力; 有效宽度法; 直接强度法; 槽形截面

中图分类号: TU392.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)02-0177-07

## Comparison of design methods for axially buckling loads of cold-formed thin-walled channels

HUANG Lihua, YANG Wenbin, XU Jia

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In the light steel structure design codes of various countries, the calculation of the axially buckling loads of cold-formed thin-walled steel members is mainly based on the effective width method and direct strength method. In this paper, through the study of the formulas in American Iron and Steel Institute (AISI) and the Chinese Cold-formed Steel Specification (GB 50018—2014 draft), 76 specimens of regular channel sections are taken as the objects, the comparison of axially buckling loads obtained from the different calculation methods with the experiment results was conducted. The accuracy, reliability and the differences of calculation results based on the algorithms in the two countries' specifications are analyzed. Results show that the calculation results of the direct strength method in the Chinese code (draft) and the effective width method in the American code are closer to the bearing capacity of the specimens. The calculation results of the effective width method in the Chinese code (draft) are conservative, while the calculation results of the direct strength method in the American code are dangerous and discrete.

**Key words:** Cold-formed thin-walled steel; axial compression capacity; effective width method; direct strength method; channel section

目前在多数国家的冷弯钢规范中, 稳定承载力的设计方法主要是基于有效宽度法和直接强度法建立的。有效宽度法是通过折减构件截面的面积来考虑板件发生局部屈曲对构件整体承载力的降低作用。有效宽度法经过几十年的发展, 相关设计理论已经比较完备, 可以计算各种受力形式和边界条件的简单截面板件。但随着构件截面越发的轻薄、复杂, 板件的屈曲系数求解也愈发复杂, 导致板件截面的有效特性计算繁琐或难以计算, 阻碍了新型截面形式构件的发展。此外, 由

于截面板件弯折成各种复杂加劲形式后, 板件的局部稳定性有很大提高, 然而这种薄壁高强截面构件易出现另一种更复杂的屈曲模式—畸变屈曲<sup>[1]</sup>。畸变屈曲是区别于局部屈曲和整体屈曲的新屈曲形式<sup>[2]</sup>, 其性能不同于一般的局部屈曲, 很难用有效宽度法进行计算。而直接强度法可以很好地解决有效宽度法的不足, 作为一种新兴设计方法, 直接强度法是通过折减构件强度来考虑板件局部或截面畸变屈曲对构件整体承载力的降低作用, 不需要确定截面的有效宽度, 使用毛截面计算构件的承载能力, 可以方便地计算带有复杂加

劲截面的承载能力,有助于新型截面形式的推广和应用。

本文在总结有效宽度和直接强度理论基础上,依据美国钢铁协会(AISI)规范<sup>[3]</sup>和中国冷弯钢规范(2014)征求意见稿<sup>[4]</sup>,将选取的试件计算结果与试验结果进行对比,为建立合理的冷弯薄壁型钢轴压承载力的设计方法提供参考。

## 1 有效宽度法

当板件具有较强的侧边支撑时,有时板件屈曲后并不会破坏,还可以继续承担荷载,而且板件宽厚比越大,可发挥的强度潜力越大。对于板件屈曲后强度的利用,1932年冯·卡门<sup>[5]</sup>首次提出了“有效宽度”的概念,并提出了用于加劲板件设计的计算公式,公式如下:

$$\frac{b_e}{t} = 1.9 \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (1)$$

式中:  $b_e$ 、 $t$  是板件的有效宽度和厚度;  $E$  为材料的弹性模量;  $f_y$  为材料的屈服强度。

1946年 Winter 教授<sup>[6]</sup>在大量试验研究的基础上对冯·卡门公式进行了改进,提出了计算沿两纵边简支的板有效宽度计算公式:

$$\frac{b_e}{t} = 1.9 \sqrt{\frac{E}{\sigma_{\max}}} \left[ 1 - 0.475 \left( \frac{t}{b} \right) \sqrt{\frac{E}{\sigma_{\max}}} \right] \quad (2)$$

式中:  $b$  是板件的宽度;  $\sigma_{\max}$  是板件受到的最大应力。

以往的分析方法是基于理论推导,没有对各种复杂因素进行确切的定量描述,式(2)是一个半经验半理论的计算公式,通过引入修正系数,考虑薄壁柱的初始缺陷、残余应力等各种因素的影响,计算结果更接近于实际构件。

1968年 T. Pekoz 等人经过长期研究,将 Winter 教授的公式一般化,推广为适用于各类板件在各种受力状态的 Winter 公式,并定义为受压构件有效宽度计算的统一法则<sup>[7]</sup>,这大大拓宽了有效截面法的适用范围,并可以很好的用以指导设计。美国 AISI 规范在 1996 年修订时采用此公式来计算截面的有效宽度,公式如下:

$$\begin{aligned} b_e &= b & \lambda \leq 0.673 \\ b_e &= \rho b & \lambda > 0.673 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1}{\lambda} \left( 1 - \frac{0.22}{\lambda} \right) \\ \lambda &= \sqrt{\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{cr}}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\rho$  是板件宽度的折减系数;  $\lambda$  是板的柔度系

数;  $\sigma_{cr}$  是板件的弹性屈曲临界应力,采用经典薄板弹性稳定理论计算,临界应力计算公式为

$$\sigma_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)(b/t)^2} \quad (5)$$

式中,  $k$  是板件屈曲系数,与板件边界条件、受力和幅面尺寸比值有关。

采用式(3)~(4)计算的板件和构件的极限强度与试验结果比较符合,澳大利亚、欧洲和北美许多国家规范都采用此通式来计算冷弯薄壁型钢板件的有效宽度<sup>[8]</sup>。

中国冷弯型钢规范<sup>[9]</sup>中板件有效宽度的计算公式不同于国外通用的有效宽度设计公式,但本质也是来源于 Winter 公式。我国有效宽度计算采用三段式,对加劲板件、部分加劲板件和非加劲板件都适用,详细计算公式参见文献<sup>[9]</sup>。

对有效宽度计算,最核心的是屈曲系数  $k$  的计算。对于单向均匀受压的加劲板件和非加劲板件,各国规范根据精确的解析解规定屈曲系数为  $k=4$  和 0.43;而单向均匀受压的部分加劲板件由于卷边约束程度不同,会呈现不同的屈曲性能,因此目前还没有统一的解析解。中国现行冷弯钢规范不考虑卷边的约束影响,统一取 0.98,但在中国冷弯型钢规范(意见稿)中则考虑了畸变屈曲的影响,不再取定值而是根据公式计算。美国 AISI 规范在确定均匀受压部分加劲板件稳定系数时,根据边缘加劲板件尺寸分为两种情况计算。

## 2 直接强度法

1998年 Schafer 和 Pekoz<sup>[10]</sup>总结了前人的研究成果,首次提出了冷弯型钢构件直接强度设计方法,并对其发展做了大量研究工作,通过对 17 位研究者的 574 根受弯构件试验数据进行回归分析,得到了受弯构件直接强度设计曲线。2002年, Schafer 基于已有梁的研究工作,又把直接强度法引入到柱中,给出了轴压柱直接强度法设计公式<sup>[11]</sup>。

直接强度法是根据构件截面的弹性屈曲性能,通过强度设计曲线来预测构件的极限强度,所以只需要知道构件的屈服应力和弹性临界局部、畸变和整体屈曲应力,再将其代入整个截面直接强度设计公式,就可求得构件的极限强度。整个过程不需要求解构件的有效截面属性,使用构件的毛截面,因此方便进行复杂截面的强度计算,并且考虑了构件发生畸变屈曲变形情况,可以求解畸变屈曲强度。直接强度法作为一种新兴的设计

方法目前已被北美、澳洲写入规范作为有效宽度法的替代方法,我国的《冷弯型钢结构技术规范》(征求意见稿 2014)<sup>[4]</sup>也采纳了这一方法。

### 2.1 AISI 规范中直接强度法

AISI 规范<sup>[3]</sup>中轴心受压构件直接强度法的计算公式如下:

(1)整体屈曲承载力( $P_{ne}$ ):

$$P_{ne} = \begin{cases} Af_y(0.658\lambda_c^2), & \lambda_c \leq 1.5 \\ Af_y\left(\frac{0.877}{\lambda_c^2}\right), & \lambda_c > 1.5 \end{cases}$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{f_y}{f_{cre}}} \quad (6)$$

式中: $A$ 是构件截面面积; $f_y$ 是材料的屈服强度; $f_{cre}$ 是构件整体屈曲弹性临界应力(取构件弯曲和弯扭屈曲应力的最小值)。

(2)畸变屈曲承载力( $P_{nd}$ ):

$$P_{nd} = \begin{cases} Af_y, & \lambda_d \leq 0.561 \\ Af_y\left(\frac{f_{crd}}{f_y}\right)0.6\left[1-0.25\left(\frac{f_{crd}}{f_y}\right)0.6\right], & \lambda_d > 0.561 \end{cases}$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{f_y}{f_{crd}}} \quad (7)$$

式中, $f_{crd}$ 是截面畸变屈曲弹性临界应力。

(3)局部-整体相关屈曲承载力( $P_{nl}$ ):

$$P_{nl} = \begin{cases} Af_{ne}, & \lambda_l \leq 0.776 \\ Af_{ne}\left(\frac{f_{crl}}{f_{ne}}\right)0.4\left[1-0.15\left(\frac{f_{crl}}{f_{ne}}\right)0.4\right], & \lambda_l > 0.776 \end{cases}$$

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{f_{ne}}{f_{crl}}} \quad (8)$$

式中, $f_{crl}$ 是截面局部屈曲弹性临界应力。

轴心受压构件的稳定承载力为  $P_n = \min(P_{ne}, P_{nl}, P_{nd})$ 。

### 2.2 中国规范(意见稿)中直接强度法

中国规范(意见稿)<sup>[4]</sup>中轴心受压构件直接强度法的计算公式如下:

(1)局部-整体相关屈曲承载力( $N_{nl}$ ):

$$N_{nl} = \begin{cases} N_{ne}, & \lambda_l \leq 0.847 \\ \left[1-0.10\left(\frac{N_{crl}}{N_{ne}}\right)0.36\right]\left(\frac{N_{crl}}{N_{ne}}\right)0.36N_{ne}, & \lambda_l > 0.847 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\lambda_l$ 是无量纲长细比, $\lambda_l = \sqrt{N_{ne}/N_{crl}}$ ;  $N_{crl}$ 是局部屈曲临界荷载, $N_{crl} = A\sigma_{crl}$ ;  $N_{ne}$ 是构件整体稳定承载力,按下式计算:

$$N_{ne} = A\varphi f_y \quad (10)$$

式中: $A$ 是全截面面积; $f_y$ 是钢材的强度标准值; $\varphi$ 是轴心受压构件稳定系数。

(2)畸变与整体相关屈曲承载力( $N_{nd}$ )

$$N_{nd} = \begin{cases} N_{ne}, & \lambda_d \leq 0.561 \\ \left[1-0.25\left(\frac{N_{crd}}{N_{ne}}\right)0.6\right]\left(\frac{N_{crd}}{N_{ne}}\right)0.6N_{ne}, & \lambda_d > 0.561 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\lambda_d$ 是无量纲长细比, $\lambda_d = \sqrt{N_{ne}/N_{crd}}$ ;  $N_{crd}$ 是畸变屈曲临界荷载, $N_{crd} = A\sigma_{crd}$ 。

轴心受压构件的承载力为  $N = \min(N_{nl}, N_{nd})$ 。

## 3 算例分析

依据美国 AISI 规范<sup>[3]</sup>和中国冷弯型钢结构技术规范(征求意见稿 2014)<sup>[4]</sup>中的有效宽度法和直接强度法计算公式,选取文献[12-16]中的 76 个发生局部、畸变、整体及耦合屈曲的槽形截面轴心受压杆件,分别计算了各杆件的极限承载力并与试验结果对比见表 1~表 5,篇幅限制,表 2~表 5 只列出最终统计结果。其中采用 AISI 规范中的直接强度法计算时,使用了广义梁软件 GBTUL<sup>[17]</sup>计算构件均匀受压时的弹性局部和畸变临界屈曲应力;而中国冷弯钢规范(征求意见稿)中的直接强度法则提供了临界屈曲应力的计算公式。为了更真实反映试验构件的计算值,更好的与试验结果进行比较,规范中的材料强度值统一取各构件通过材性试验得到的屈服强度  $f_y$ 。

综合分析上述计算结果可知,中国有效宽度法的计算结果最保守,对所有试件的计算结果都是最小的,而且离散性偏大,美国有效宽度法与试验数据则拟合的较好,离散程度较好。虽然中国规范(意见稿)<sup>[4]</sup>中部分加劲板板件屈曲系数的计算考虑了畸变影响,相对现行冷弯钢规范<sup>[9]</sup>屈曲系数得到了提高,不再统一取 0.98,但有些截面翼缘屈曲系数和有效宽度相对美国规范计算值还是明显偏低。依据中国和美国规范计算的部分加劲板件屈曲系数和有效宽度比值随计算系数  $\rho$  的关系见图 1 和图 2。从图中可以发现,计算系数  $\rho$  偏小时,依据中国规范计算的部分加劲板件有效宽度和屈曲系数要比美国规范计算值小很多。即使有一部分部分加劲板件依据中国规范计算的屈曲系数大于美国规范计算值,但计算的有效宽度仍比美国规范计算值偏小。

表 1 文献[12]试件承载力的计算值与试验值对比

Tab. 1 Comparison of ultimate loads between the computation and test for specimens in literature [12]

试件编号	$P_t/\text{kN}$	屈曲形式	$P_1/\text{kN}$	$P_2/\text{kN}$	$P_3/\text{kN}$	$P_4/\text{kN}$	$P_1/P_t$	$P_2/P_t$	$P_3/P_t$	$P_4/P_t$
P36F0280	65.0	L+F	57.29	64.58	74.74	64.15	0.881	0.994	1.150	0.987
P36F1000	59.0	L+F	51.21	56.29	66.22	61.53	0.868	0.954	1.122	1.043
P36F1500	50.1	L+F	42.64	47.15	53.65	61.39	0.851	0.941	1.071	1.225
P36F2000	41.7	F	33.04	37.32	40.87	52.71	0.792	0.895	0.980	1.264
P36F2500	32.8	F	25.83	29.33	31.7	36.01	0.788	0.894	0.966	1.098
P36F3000	24.7	F	20.33	23.19	23.69	25.33	0.823	0.939	0.959	1.026
P48F0300	66.0	L+F	49.01	61.96	63.05	59.15	0.743	0.939	0.955	0.896
P48F1000	62.7	L+F	45.25	56.4	58.24	56.34	0.722	0.900	0.929	0.899
P48F1500	55.5	L+F	40.46	49.71	51.94	56.15	0.729	0.896	0.936	1.012
P48F1850	47.2	L+F	35.53	44.29	45.22	56.12	0.753	0.938	0.958	1.189
P48F2150	43.6	L+F	31.76	39.45	39.88	56.12	0.728	0.905	0.915	1.287
P48F2500	38.5	L+F	28.16	33.81	34.6	50.35	0.731	0.878	0.899	1.308
P48F3000	37.4	L+F+FT	23.44	27.6	28.64	36.46	0.627	0.738	0.766	0.975
P48F3500	29.5	F+FT	19.64	23.26	24.09	28.08	0.666	0.788	0.817	0.952
均值							0.764	0.900	0.959	1.083
标准差							0.071	0.064	0.100	0.140

注： $P_t$ —试验结果； $P_1$ —中国规范有效宽度法计算结果； $P_2$ —AISI(2016)有效宽度法计算结果； $P_3$ —中国规范直接强度法计算结果； $P_4$ —AISI(2016)直接强度法计算结果。

表 2 文献[13]试件承载力的对比

Tab. 2 Comparison of ultimate loads in literature [13]

类别	$P_1/P_t$	$P_2/P_t$	$P_3/P_t$	$P_4/P_t$
平均值	0.794	0.900	0.900	0.919
标准差	0.093	0.078	0.083	0.068

备注：卷边槽钢试件 12 个

表 3 文献[14]试件承载力的对比

Tab. 3 Comparison of ultimate loads in literature [14]

类别	$P_1/P_t$	$P_2/P_t$	$P_3/P_t$	$P_4/P_t$
平均值	0.929	1.004	0.949	1.147
标准差	0.092	0.098	0.080	0.182

备注：卷边槽钢试件 15 个

表 4 文献[15]试件承载力的对比

Tab. 4 Comparison of ultimate loads in literature [15]

类别	$P_1/P_t$	$P_2/P_t$	$P_3/P_t$	$P_4/P_t$
平均值	0.980	1.089	1.021	1.210
标准差	0.105	0.096	0.112	0.133

备注：卷边槽钢试件 15 个

表 5 文献[16]试件承载力的对比

Tab. 5 Comparison of ultimate loads in literature [16]

类别	$P_1/P_t$	$P_2/P_t$	$P_3/P_t$	$P_4/P_t$
平均值	0.739	0.979	0.933	0.890
标准差	0.054	0.058	0.042	0.053

备注：卷边槽钢试件 20 个

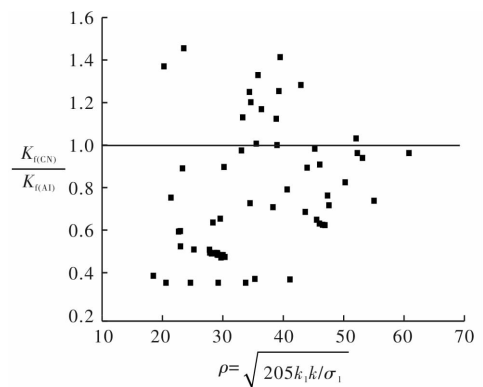
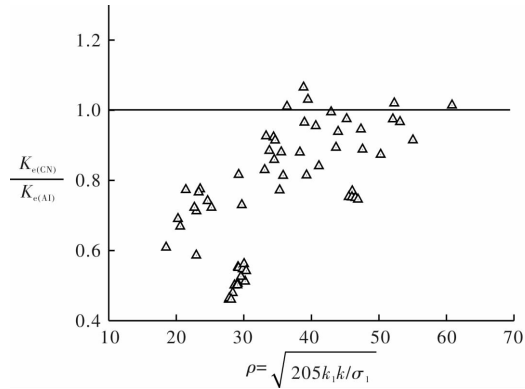


图 1  $K_{t(CN)}/K_{t(AI)}-\rho$  关系

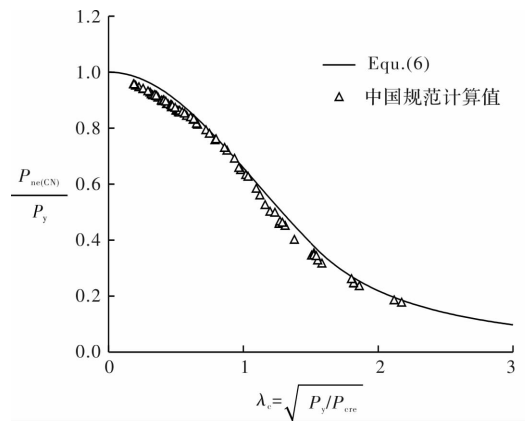
Fig. 1 Relationship between  $K_{t(CN)}/K_{t(AI)}-\rho$

采用直接强度法计算上述试件时，依据美国规范计算的结果偏危险，且离散性最大。而依据中国规范计算的结果与上述 5 篇文献的试验结果更接近，离散性更小，适用性更广。两国规范中直

图2  $B_{e(CN)}/B_{e(AI)}-\rho$  关系Fig. 2 Relationship between  $B_{e(CN)}/B_{e(AI)}-\rho$ 

接强度法的异同点主要体现在以下方面:

(1)两国规范中都通过折减系数来计算杆件整体屈曲承载力. 在中国冷弯钢规范(征求意见稿)<sup>[4]</sup>中, 根据截面主轴最大长细比和钢材屈服强度查表, 得到折减系数(轴心受压构件稳定系数  $\varphi$ ). 而美国规范中的折减系数是一个两段计算式, 由公式计算获得. 如图3所示, 采用中国规范计算得到的76个试件的整体屈曲承载力与屈服荷载比值接近于美国规范的整体屈曲强度设计曲线, 在整体长细比较小时, 中国规范计算的整体承载力要更保守一些. 因为依据两国规范公式计算的整体弹性屈曲应力一样, 所以整体长细比也一样.

图3  $P_{ne(CN)}/P_y$  和 Eq. (6) 对比Fig. 3 Comparison of the  $P_{ne(CN)}/P_y$  with Eq. (6)

(2)对于局部屈曲荷载的计算, 两国规范中公式(8)和公式(9)的基本形式是一样的, 只是公式系数、指数和分段点不同. 中国规范采用手算弹性局部屈曲临界荷载, 而美国规范要用数值计算, 两者的计算结果相差不大, 所以两国规范计算的构件局部长细比基本一致. 由图4两国局部荷载设计曲线的对比可见, 美国规范要比中国规范保守. 以中国规范计算的局部长细比  $\lambda_1$  为自变量, 依据两国规范计算得到的76个试件的局部荷载对比如图

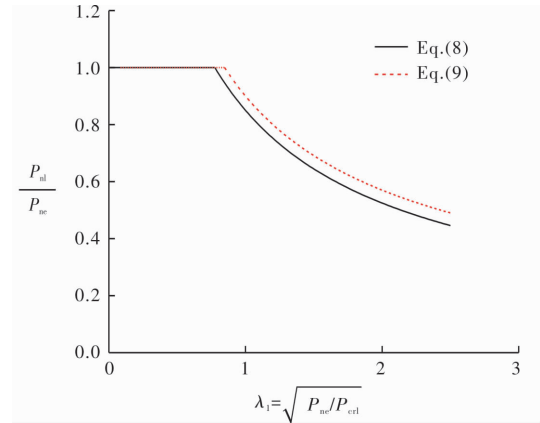
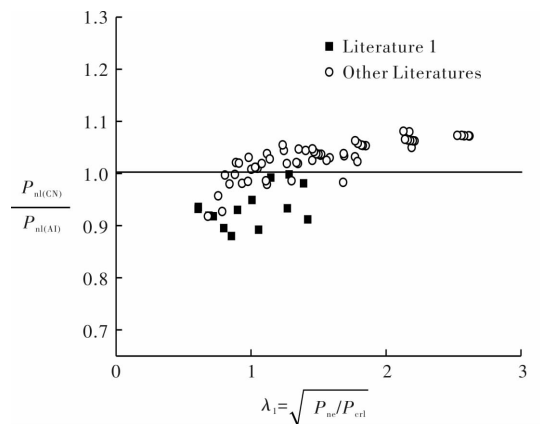


图4 Eq. (8)和 Eq. (9)对比

Fig. 4 Comparison of Eq. (8) with Eq. (9)

5, 从图中可以看出, 除文献[14]中的无卷边槽形试件外, 其余大多数试件依据中国规范计算得到的局部承载力  $P_{nl}$  要大于基于美国规范得到的承载力  $P_{nl}$ .

图5  $P_{nl(CN)}/P_{nl(AI)}-\lambda_1$  关系Fig. 5 Relationship between  $P_{nl(CN)}/P_{nl(AI)}-\lambda_1$ 

(3)在计算畸变屈曲荷载时, 依据中美规范得到的结果差别较大. 主要原因在于中国规范考虑了畸变屈曲与整体屈曲的耦合作用. 而美国规范则把畸变屈曲当作整体屈曲一样处理, 所以用中国规范计算的畸变荷载明显要更小.

中国规范中局部强度设计曲线要比畸变曲线保守不少, 如图6所示. 所以畸变荷载往往起控制作用, 文中依据中国规范计算的试件承载力大多数也是由畸变荷载控制. 美国规范把畸变屈曲当作整体屈曲一样对待, 往往局部屈曲荷载起控制作用, 文献[11]无卷边槽钢因为没有卷边, 不少杆件畸变荷载小于局部荷载. 因为两国规范计算的局部荷载值相差不大, 所以文中多数试件用中国规范计算的承载力要比美国规范偏保守. 把由畸变荷载控制的构件试验荷载和我国规范算得的整体荷载比值同我国畸变荷载柱子设计曲线相比

较,如图6所示。从图中可以看出我国畸变荷载柱子设计曲线,在长细比很小时,比较保守,随着长细比的增大,保守程度逐渐降低。

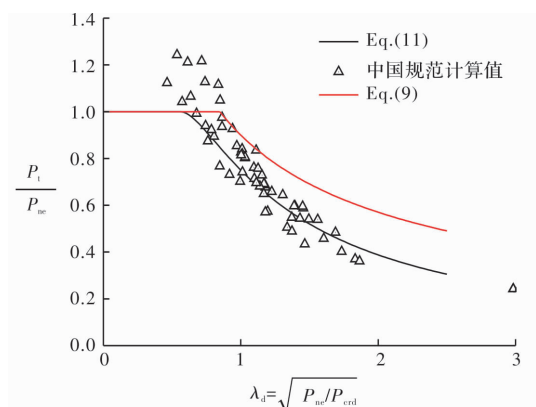


图6  $P_t/P_{ne}$ 和(Eq. (11))对比

Fig. 6 Comparison of the  $P_t/P_{ne}$  with (Eq. (11))

## 4 结论

(1)有效宽度法计算的关键是板件屈曲系数的计算,虽然中国规范(意见稿)中部分加劲板板件屈曲系数的计算考虑了畸变影响,相对现行冷弯钢规范屈曲系数有所提高,但有些截面部分加劲板件屈曲系数和有效宽度相对美国规范计算值还是明显偏低,中国有效宽度法计算结果相对美国规范还是要偏保守。

(2)直接强度法计算的关键是弹性屈曲临界应力的确定,对于整体弹性屈曲应力,两国规范计算值一样,所以整体长细比也一样。对于局部和畸变弹性屈曲应力,美国规范没有给出具体的理论计算公式,一般采用数值方法计算,本文采用广义梁软件GBTUL进行计算,中国规范给出了具体计算公式。本文计算结果显示:两者计算的局部弹性临界应力相差不大,即局部长细比基本相同,但畸变临界应力相差很大。

(3)依据两国规范直接强度法计算的试件整体和局部屈曲荷载相差不大,但总体美国规范计算值更高一点,畸变荷载的计算相差很大,中国规范考虑了畸变屈曲与整体屈曲的耦合作用,所以计算的畸变荷载明显更低。总体而言,因为中国规范考虑了畸变屈曲与整体屈曲的耦合作用,中国规范直接强度法的计算结果要比美国的更保守一些。

(4)根据本文计算结果可知,中国规范(意见稿)的直接强度法和美国的有效宽度法计算的试件承载力相差不大,与试验数据拟合的较好;中国规范(意见稿)有效宽度法的计算结果偏保守,所

有试件承载力计算值都偏小;而美国的直接强度法计算的承载力最大,偏危险且波动幅度最大,这主要是由于用广义梁计算的畸变荷载会随试件长度发生明显变化,与理论解不相符,导致构件由畸变荷载控制时,计算不够精确。

## 参考文献 References

- [1] CHEN Ju, HE Yong, JIN Weiliang. Stub column tests of thin-walled complex section with intermediate Stiffeners [J]. Thin-walled structures, 2010, 48 (6): 423-429.
- [2] 陈骥. 冷弯薄壁型钢构件的直接强度设计法[J]. 建筑钢结构进展, 2003, 5(4): 5-13.  
CHEN Ji. Direct strength design method for cold-formed thin-walled steel members [J]. Progress of building Steel Structures, 2003, 5(4): 5-13.
- [3] American Iron and Steel Institute. North American specification for the design of cold-formed steel structural members: S100—2016 [S]. Washington D C: American Iron and Steel Institute, 2016.
- [4] 中南建筑设计院股份有限公司. 冷弯型钢结构技术规范: GB 50018—2014(征求意见稿)[S]. 2016.  
Central South Architectural Design Institute co. LTD. Technical Code of Cold-Formed Steel Structures: GB 50018—2014(Exposure Draft) [S]. 2016.
- [5] KARMAN T, SECHLER E E, DONNEL L H. The strength of thin plates in compression[J]. Transactions of the ASME, 1932, 54(5): 53-56.
- [6] WINTER G. Strength of thin steel compression flanges [J]. Transactions of the ASCE, 1947, 112: 527-554.
- [7] PEKOZ T. Development of a unified approach to the design of cold-formed steel members[R]. Washington DC: American Iron and Steel Institute, 1986: 9-26.
- [8] 陈骥. 钢结构稳定理论与设计[M]. 5版. 北京: 科学出版社, 2011.  
CHEN Ji. Stability theory and design of steel structure [M]. 5th edi. Beijing: Science Press, 2011.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 冷弯薄壁型钢结构技术规范: GB 50018—2002[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.  
Ministry of Construction of P. R. China. Technical code of cold-formed thin-walled steel structures: GB 50018—2002[S]. Beijing: China Planning Press, 2002.
- [10] SCHAFER B W, PEKOZ T. Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions[C]//14th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, St. Louis: Missouri, 1998: 137-144.
- [11] SCHAFER B W. Local, Distortional, Euler buckling

- of thin-walled columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(3): 289-299.
- [12] YOUNG B, RASMUSSEN K. Tests of fixed-ended plain channel columns[J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(2): 131-139.
- [13] YOUNG B, RASMUSSEN K. Design of lipped channel columns [J]. Journal of Structural Engineering, 1998, 124(2): 140-148.
- [14] YOUNG B, SILVESTRE N, CAMOTIM D. Cold-formed steel lipped channel columns influenced by local-distortional interaction: strength and DSM design [J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 139(6): 1059-1074.
- [15] KWON Y B, KIM B S, HANCOCK G J. Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(2): 278-289.
- [16] LOUGHLAN J, YIDRIS N, JONES K. The Failure of thin-walled lipped channel compression members due to coupled local-distortional interactions and material yielding[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 61(6): 14-21.
- [17] BEBIANO R, SILVESTRE N, CAMOTIM D. GBTUL-a code for the buckling analysis of cold-formed steel members[C]//19th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. St. Louis, Missouri, U. S. A: 2008: 61-79.

(编辑 桂智刚)

(上接第 160 页)

- [7] 邢海燕,樊久铭,李雪峰,等. 基于磁记忆机理的铁磁材料弯曲变形状态研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 1017-1020.
- XING Haiyan, FAN Jiuming, LI Xuefeng, et al. Bend deformation state of ferromagnetic materials based on metal magnetic memory theory[J]. Journal of harbin institute of technology, 2006, 38(7): 1017-1020.
- [8] 中国建设标准化协会. 门式刚架轻型房屋钢结构技术规程: CECS 102—2002 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
- CECS. Technical specification for steed structure of light-weight buildings with gabled frames: CECS 102-2002[S]. Beijing: China Planning Press, 2002.
- [9] 陈绍蕃,顾强. 钢结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- CHEN Shaofan, GU Qiang. Steel structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [10] 任吉林,罗声彩. 金属磁记忆二维定量检测试验研究[C]//全国第九届无损检测学术年会. 上海: 全国无损检测学会, 2010, 473-481.
- REN Jilin, LUO Shengcai. Two-dimensional quantification testing of metal magnetic memory [C]// The National Ninth Annual Conference Proceedings of Non-destructive Testing. Shanghai: National Society for Nondestructive Testing, 2010, 473-481.

(编辑 桂智刚)