

美国钢结构设计规范的最新发展

李志明

(中国钢结构协会专家委员会)

摘 要 本文回顾了美国钢结构设计规范的发展历程, 对美国《钢结构设计规范》(ANSI/AISC 360-05) 的编制思路、主要特点做了简要介绍, 对新规范的内容变化和更新作了必要的说明。

关键词 美国钢结构协会 钢结构 ASD规范 LRFD 规范

Recent development of American Specification for structural steel Buildings

ABSTRACT This article reviewed the development of American structural steel design code, the establishment principles and main features of "Specification for structural steel Buildings" (ANSI/AISC 360-05) Approved by the AISC Committee on Specifications have been introduced briefly, the changed and updated contents of the new code were essentially explained.

KEY WORDS AISC Structural Steel ASD Specification LRFD Specification

一、美国钢结构设计规范的发展过程

美国钢结构协会 (AISC) 于 1923 年制定了第一本以容许应力法 (Allowable Stress Design, ASD) 为设计原则的钢结构设计规范。容许应力设计方法是给出一个安全系数, 并以此来度量对因材料达到屈服强度破坏或杆件进入屈曲状态而失效的抵抗能力。容许应力设计方法作为结构设计的基础延用了相当长的时间, 后历经多次修改, 直至 1961 年, 其基本格式及内容都已固定。于 1989 年出版了最后一版 ASD 设计规范 (AISC (1989), Specification for Structural Steel Buildings—Allowable Stress Design and Plastic Design)^[1], 除在 2001 年出版了对 ASD 的增补 (Supplement No.1, 共 28 页) 对规范的部分内容提出修正之外, 之后便不再有新的版本。

1986 年, AISC 的规范委员会 (简称 COS) 首次推出了第一版荷载和抗力分项系数设计规范 (AISC(1986), Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings)。LRFD 设计方法是根据各种可能的极限状态计算出构件的标准强度, 用该标准强度乘以抗力系数确定设计构件的承载力, 并将构件的承载力与构件的结构分析内力值进行比较。相对于 ASD, 虽然 LRFD 规范较为复杂, 但其依据的设计理论及实验结果比 ASD 的公式来源更具有信服力, 另外 LRFD 引入了结构可靠度的概念, 使得采用 LRFD 设计的各种构件将具有较为一致、平均和协调的安全性和可靠度。最早的 LRFD 设计规范是 AISC 的规范委员会在 1989 年继 ASD 设计规范修订改版后推出的, 在 1991 年和 1993 年对 LRFD 设计规范做了不断地改版, 并于 1999 年 12 月 27 日发布了目前使用的第三版 AISC(2000b)^[2]。

然而,在美国国家标准化协会 2003 年批准的《房屋建筑和其他结构物的最小设计荷载规范》(SEI/ASCE7-02)^[3]中,仍然保留了使用容许应力设计方法的荷载组合(如 D+L)(见 ASCE7-02, 2.4 节)和适用于 LRFD 设计方法的荷载组合(如 1.2D+1.6L)(见 ASCE7-02, 2.3 节)。究其原因,是一部份美国国内的工程师对 LRFD 不够熟悉,而另一些资深工程师对 LRFD 尚存有抵触和抗拒,使得 ASD 设计仍为流行,而 LRFD 在较长时间内无法完全取代 ASD。AISC 充分考虑了工程界的现状和实际需求,决定着手制订新一版钢结构设计规范,新版规范将融合两种设计理念,是一部可以同时包括 ASD 设计方法与 LRFD 设计方法的“统一”和“单一”的规范。

两年来,美国钢结构协会对规范改版做了大量的宣传,并于 2004 年 4 月 28 日、8 月 6 日和 11 月 23 日,三次在官方网站上公开征求修订意见和公布修订草案,在今年举行的北美地区钢结构工程年会(NASCC 2005, 2005.4.6~4.8)上新版规范首次亮相。2005 年 4 月 9 日,由美国钢结构协会(AISC)正式发布和出版了《钢结构设计规范》(ANSI/AISC 360-05)^[4]。

新的美国《钢结构设计规范》(ANSI/AISC 360-05)包括了钢结构设计条文的更新,同时包括了 ASD 与 LRFD 两种设计方法,并纳入了管(圆管和方矩管)截面和单肢角钢截面构件的设计条文,新规范公布后,下列五种版本的现行规范将同时废止:

- 《钢结构设计规范,荷载和抗力系数设计法》,1999.12.27 发布版本;
- 《钢结构设计规范,容许应力设计法和塑性设计法》,1989.6.1 发布版本;
- 《单肢角钢杆件的容许应力法设计规范》,1989.6.1 发布版本;
- 《单肢角钢杆件的荷载和抗力系数设计法设计规范》,2000.11.10 发布版本;
- 《管截面杆件的荷载和抗力系数设计法设计规范》,2000.11.10 发布版本。

二、新钢结构设计规范的特色

本次美国《钢结构设计规范》(ANSI/AISC 360-05)的修订,在规范的编制思路、表达形式和包含内容等方面,都做了较多的变动。现对新规范主要特色及修改和更新的内容作简单介绍。

1、新的表达形式

在新的美国《钢结构设计规范》(ANSI/AISC 360-05)中,保留了现行的 ASD 规范和 LRFD 规范的基本设计表达式:

若按照 LRFD 方法设计,其设计的基本表达式为:

$$R_u \leq \phi R_n \dots\dots\dots(1)$$

其中, R_u 是根据 LRFD 荷载组合而计算得到的内力设计值;

R_n 为承载力标准值；

ϕ 为抗力系数（或称强度折减系数）；

ϕR_n 为设计强度。

若按照 ASD 方法设计，其设计的基本表达式为：

$$R_a \leq R_n / \Omega \cdots \cdots (2)$$

其中， R_a 是根据 ASD 荷载组合而计算得到的内力设计值；

R_n 为承载力标准值；

Ω 为安全系数；

R_n / Ω 为容许强度。

在上述式（1）与式（2）的左侧是荷载作用效应，其右侧为抗力项，其中的承载力标准值 R_n 应该是唯一的，不会因为采用 ASD 方法或 LRFD 方法而得出不同的结果。ASD 方法与 LRFD 方法的最大差别在于因采用不同的荷载组合而得出不同的荷载作用效应，以及安全系数（ASD 方法）或抗力系数（LRFD 方法）的使用。因此，在新规范的各项相应杆件设计章节中，给出了承载力标准值的计算公式，并以并列的形式分别给出抗力系数 ϕ 和安全系数 Ω 值，如下图为新规范中计算受拉杆件屈服强度公式的表达形式（见参考文献〔3〕）

(a) For tensile yielding in the gross section:

$$P_n = F_y A_g$$

$$\phi_t = 0.90 \text{ (LRFD)} \quad \Omega_t = 1.67 \text{ (ASD)}$$

其中，抗拉设计强度为 $\phi_t P_n$ ，容许抗拉强度为 P_n / Ω_t 。

关于新规范的表达形式，有两点提请读者注意：

（1）新规范并不是简单地将 ASD 和 LRFD 两本规范叠加并罗列在一起，也并非是由 LRFD 向 ASD 的回归。由于 LRFD 规范具有较可靠的理论分析基础及试验背景，在新规范中的极大部分承载能力的计算采用了 LRFD 规范的公式，新规范在本质上是一部荷载和抗力系数设计法设计规范；

（2）在开始制定 LRFD 规范时，考虑到与 ASD 规范的衔接和对应，即同一杆件的承载力不应由于采用不同的设计规范而有所差异。为达到该目标值，对活荷载(L)与静荷载(D)的比值进行了调整，经试算，当 $L/D=3$ 时，采用 LRFD 规范取荷载组合 $1.2D+1.6L$ 和采用 ASD 规范取荷载组合 $D+L$ ，两者计算得到的杆件承载力标准值相同。两种设计方法的抗力项可分别表达为：

按照 LRFD 方法设计，

$$\phi R_n = 1.2D + 1.6L = 1.2D + 1.6 \times 3D = 6D$$

$$R_n = 6D / \phi$$

按照 ASD 方法设计，

$$R_n / \Omega = D + L = D + 3D = 4D$$

$$R_n = 4D / \Omega$$

由此可得到： $\Omega = (6D / \phi) \times (1 / 4D) = 1.5 / \phi$ ，建立了新规范中 ASD 规范的安全系数 Ω 和 LRFD 规范的抗力系数 ϕ 之间的关系。

2、使用说明（USER NOTES）代替条文说明

美国《钢结构设计规范》（ANSI/AISC 360-05）改变了以往各版规范所采用的正文加条文说明（或编制说明）的传统编排结构，而采取了根据需要在正文中插入“使用说明（USER NOTES）”的形式，“使用说明”用文字、公式或图表等形式为规范使用人员提供了规范条文的简化、直接和清晰的说明及提示，其主要特点为：

（1）“使用说明”强调了规范条文的含义和适用范围；

（2）“使用说明”为规范使用人员提供了明确的路线图，例如下图即为第五章（F 章）受弯构件设计中的“使用说明”F1.1，读者可以根据“使用说明”的提示，按截面的形状而迅速确定对应的规范条文所在的章节；

TABLE User Note F1.1 Selection Table for the Application of Chapter F Sections				
Section in Chapter F	Cross Section	Flange Slenderness	Web Slenderness	Limit States
F2		C	C	Y, LTB
F3		NC, S	C	LTB, FLB
F4		C, NC, S	NC	Y, LTB, FLB, TFY
F5		C, NC, S	S	Y, LTB, FLB, TFY
F6		C, NC, S	N/A	Y, FLB
F7		C, NC, S	C, NC	Y, FLB, WLB
F8		N/A	N/A	Y, LB
F9		C, NC, S	N/A	Y, LTB, FLB
F10		N/A	N/A	Y, LTB, LLB
F11		N/A	N/A	Y, LTB
F12	Unsymmetrical shapes	N/A	N/A	All limit states

Y = yielding, LTB = lateral-torsional buckling, FLB = flange local buckling, WLB = web local buckling, TFY = tension flange yielding, LLB = leg local buckling, LB = local buckling, C = compact, NC = noncompact, S = slender

(3) “使用说明”提供了规范条文的简化形式和说明；

(4) 对于较复杂的计算公式，“使用说明”给出了适用于大多数情况下的近似值或简化公式，例如在第五章第二节的水平扭转屈曲计算中，截面的屈曲应力计算公式 F2-4 十分繁复，“使用说明”给出了在偏于安全的考虑下根号内算式可取为 1.0，从而简化了计算过程（见下图）。

$$F_{cr} = \frac{C_b \pi^2 E}{\left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \sqrt{1 + 0.078 \frac{J_c}{S_x h_o} \left(\frac{L_b}{r_{ts}}\right)^2} \quad (\text{F2-4})$$

User Note: The square root term in Equation F2-4 may be conservatively taken equal to 1.0.

三、新钢结构设计规范的变化

1、新规范“正文”的章节编排

新版规范对旧规范中的章节作了重新组织和安排，规范章节的名称和 1999 版的规范基本保持一致，新规范正文共分十三章：**A.总则、B.设计要求、C.稳定分析和设计、D.受拉构件设计、E.受压构件设计、F.受剪构件设计、H.复合受力和受扭构件设计、I.组合构件设计、J.连接设计、K.管截面和箱形截面构件连接设计、L.适用性和舒适度设计、M.制作、安装和质量控制。**

对旧规范中原置于附录部分的板梁和细长受压杆设计条文和内容，新规范已将其放入正文的各相应章节中。

对于管（圆管和方矩管）截面和单肢角钢截面构件的设计，新规范根据杆件的受力特点加入到各对应的章节中，而不再是独立的单本规范。

2、新规范“附录”的主要变化

旧规范的附录设置是对应于规范正文的，其内容包括对规范条文的进一步解释和说明。新版规范对旧规范的附录内容做了较大变动，从规范正文中去除了出现频率较低或设计经验不足的条文和内容而加入到“附录”中，如 1999 版 LRFD 规范中的 **N.已有结构的评估**已改为新规范的附录 5，将考虑积水效应和疲劳设计内容分为附录 2 和附录 3，新增了受火条件下的结构设计、梁柱稳定支撑设计和直接分析法等附录内容。

新规范附录共分七部分，包括：附录 1.弹塑性分析和设计、附录 2.考虑积水效应（PONDING）的屋面系统设计、附录 3.疲劳设计、附录 4.受火条件下的结构设计、附录 5.已有结构的评估、附录 6.梁柱稳定支撑的设计、附录 7.直接分析法等。

3、新规范的“条文说明”

除了规范正文中的“使用说明”之外，2005 年 4 月 9 日，美国钢结构协会在发布《钢结构设计规范》（ANSI/AISC 360-05）的同时，公开出版了《关于钢结构设计规范的条文说明》（COMMENTARY on the Specification for Structural Steel Buildings）^{〔5〕}。与旧版本比较，“条文说明”明确告知：本“条文说明”不是《钢结构设计规范》（ANSI/AISC 360-05）的一部份，而只是为规范使用人员提供规范条文的编制背景、文献出处等信息帮助，以进一步加深人们对规范条文的基础来源、公式推导和使用限制等的了解。

“条文说明”也包括正文和附录两部分，其章节编排和名称和《钢结构设计规范》（ANSI/AISC 360-05）完全一致，并附有详尽的参考文献资料目录。

四、结语

本文是以简要回顾美国钢结构设计规范发展过程为基础，对美国钢结构协会在最新发布的《钢结构设计规范》（ANSI/AISC 360-05）的特色和主要变动作了介绍，帮助国内工程技术人员掌握美国的各种不同设计概念和不同版本的钢结构设计规范，进一步了解钢结构工程领域的最新发展，以推动和提高我国钢结构设计和科研水平。

参考文献

1 AISC (1989), Specification for Structural Steel Buildings—Allowable Stress Design and Plastic Design, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, IL.

2 AISC (2000b), Specification for Structural Steel Buildings—Load and Resistance Factor Design, December 27, 1999, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, IL., 1999.12.27

3 SEI/ASCE7-02, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, American Society of Civil Engineers

4 AISC(2005), Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360-05, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, IL., 2005.4.9

5 COMMENTARY on the Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, IL., 2005.4.9