

# 7A04 高强铝合金矩形管的弯曲性能参数化分析

刘佳钰<sup>1</sup>, 李雪峰<sup>1</sup>, 张成<sup>1</sup>, 周扬锋<sup>2</sup>, 张若瑜<sup>2</sup>

(1. 华北中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300000; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津市 300072)

**摘要:** 利用数值分析方法计算了铝合金矩形管纯弯曲构件的荷载-位移全过程关系曲线, 计算结果与试验结果吻合程度较好。基于全过程分析结果, 推导了高强铝合金抗弯强度的简化计算公式, 可供工程设计时参考。

**关键词:** 铝合金抗弯承载力; 简支梁数值分析; 矩形截面结构设计; 7A04 高强铝合金

**中图分类号:** U444

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2021)03-0159-05

## 0 引言

由于铝合金具有密度小、强重比高、耐腐蚀、焊接性能好、维护费用低及可循环利用等诸多优点, 在桥梁工程中越来越引起人们的兴趣与重视, 铝合金结构桥梁已成为桥梁建设的一种趋势。Moen 等<sup>[1]</sup>、De Matteis 等<sup>[2-3]</sup>和 Manganiello 等<sup>[4]</sup>对铝合金梁在弯矩梯度作用下的强度和转动性能进行了大量的试验和数值研究。Eberwien 等<sup>[5]</sup>提出了一种获得对称铝截面的弯矩-曲率响应方法。Schafe 等<sup>[6]</sup>最初为冷弯型钢结构构件设计开发的直接强度法(DSM)被扩展到铝合金薄壁截面, 并发现所得结果与 Zhu 等<sup>[7]</sup>进行的一系列梁试验结果相反。铝合金的屈服后材料特性(应变硬化和延展性)对铝合金梁的弯曲性能有很大影响<sup>[1,8-9]</sup>。在强调这2个因素的情况下, Kim 等<sup>[10]</sup>对铝合金粗截面梁进行试验并建立数值模型, 以确定其最终的非弹性弯曲承载力, 结果发现可以达到最终的材料强度。最近, 一种基于变形的的设计方法, 即连续强度法(CSM), 被提出用于非线性金属结构构件<sup>[11-15]</sup>。CSM 涉及确定横截面的极限应变, 该极限应变与应变硬化材料模型一起用于确定承载能力。上述研究主要集中于圆形截面铝合金管以及6系材料铝合金管的研究, 而对于7A04 高强铝合金矩形管的研究较为欠缺。本文首先通过有限元模型对已有试验结果进行验证, 其次对长细比范围为14~143的矩形管进行有限元模拟, 并与按照《钢结构设计规范》(GB/T 50017—2017)、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB

50018—2002)和《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)给出的公式计算得到的结果进行对比, 提出了符合本试验结果的7A04 高强铝合金矩形管弯曲极限承载力计算公式, 以期今后的工程运用提供参考。

## 1 有限元模型

### 1.1 单元类型及单元尺寸

针对图1所示的简支梁, 选用实体梁单元进行建模。通过模拟发现, C3D8I 单元对矩形铝合金梁弯曲性能的模拟效果较好, 因此本文单元类型选择 C3D8I 线性非协调模式实体单元。

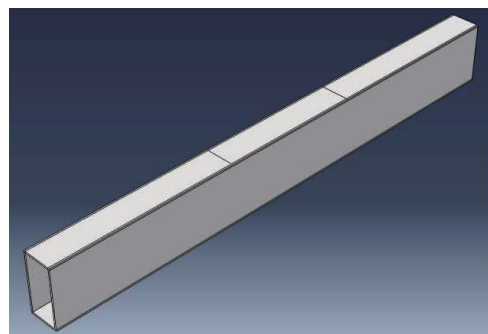


图1 实体梁单元

网格尺寸的大小直接影响计算结果的精确度和计算效率。随着网格尺寸的加密, 单元的个数越来越多, 计算时间越来越长, 计算精度也不断提高。但网格尺寸为5 mm 的计算精度提高量远远小于计算时间的增加量, 综合计算精度和计算效率的影响, 本文网格尺寸采用5 mm, 具体如图2所示。

### 1.2 材料属性

本构模型采用 Ramberg-Osgood 模型, 即  $\varepsilon = \sigma / E + 0.002 (\sigma / f_{0.2})^n$ , 式中各力学性能参数定义参见文献[16]; 铝合金材料的弹性模量  $E$ 、名义屈服强度(也称

收稿日期: 2020-07-22

作者简介: 刘佳钰(1983—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事道路桥梁设计工作。

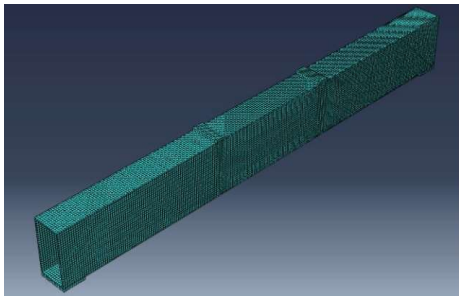


图 2 网格划分

规定非比例伸长应力  $f_{0.2}$ 、极限抗拉强度  $f_u$  见表 1。

表 1 铝合金力学性能参数表<sup>[16]</sup> 单位: MPa

| $E$    | $f_{0.2}$ | $f_u$  |
|--------|-----------|--------|
| 69 035 | 176.2     | 236.96 |

本文的弯曲分析要考虑材料的非线性,即在高应力、高应变情况下,材料的应力-应变关系不再是线性关系,材料会产生塑性变形。Abaqus 中采用塑性模型,即采用真实应力、真实应变来定义材料的后屈服性能。通常通过材性试验得到的应力、应变指的是工程应力(名义应力  $\sigma_{nom}$ )、工程应变(名义应变  $\varepsilon_{nom}$ ),而在 Abaqus 中定义塑性数据时采用的是真实应力  $\sigma_{true}$ 、真实应变  $\varepsilon_{true}$ ,因此需将工程应力  $\sigma_{nom}$  与工程应变  $\varepsilon_{nom}$  转化为真实应力  $\sigma_{true}$  和真实应变  $\varepsilon_{true}$ ,见式(1)、式(2)。

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \tag{1}$$

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom} (1 + \varepsilon_{nom}) \tag{2}$$

1.3 边界条件和加载方法

本文参照文献 [16],在铝合金梁两端设置 U1、U2、UR3 的约束,保证梁在平行于支座方向时可以发生自由转动。建模时,在下部支座中心处设置一参考点,耦合参考点与相应的端面,如图 3 所示。

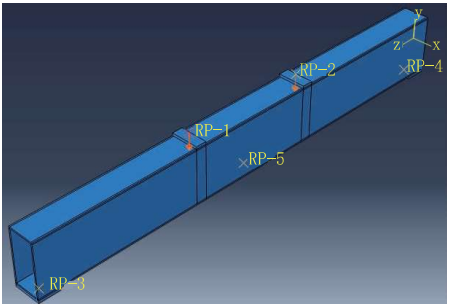


图 3 支座约束

参照文献[16],采用位移加载的方式施加荷载,利用 Amplitudes 建立加载的规律进行加载。

1.4 有限元验证

为验证有限元模型的准确性,本文从极限承载力、失稳破坏形态两方面对有限元模型结果和文献[16]的试验结果进行对比。该类梁弯矩破坏模式包括:(I)梁整体弯曲;(II)三分点受压区处局部屈曲而失稳并伴随开裂(TPB)。有限元模型的承载力  $F_{FEA}$  与试验承载力  $F_{EXP}$  以及失稳破坏形态对比见表 2。由表 2 可知:除试件  $130.4 \times 65.2 \times 2.6$  外,其余试件有限元模型结果与试验结果的误差均在 15%以内,有限元模型的稳定承载力与试验得到的稳定承载力基本吻合。铝合金梁的 Mises 云图和铝合金梁的变形图见图 4、图 5。

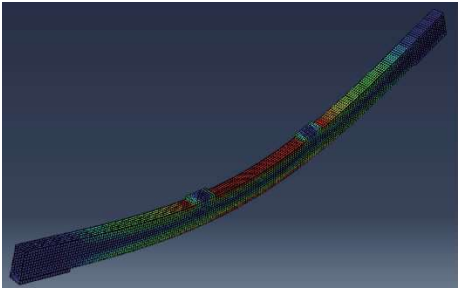


图 4 铝合金梁 Mises 云图

表 2 有限元模型结果与试验结果<sup>[16]</sup>比较(试件长度均为 1 000 mm)

| 试件编号                | 试验结果                  |      | 有限元模型结果               |      | $F_{EXP} / F_{FEA}$ |
|---------------------|-----------------------|------|-----------------------|------|---------------------|
|                     | $F_{EXP} / \text{kN}$ | 失效模式 | $F_{FEA} / \text{kN}$ | 失效模式 |                     |
| 130.4 × 65.2 × 2.6  | 41.50                 | I+II | 70.50                 | I+II | 0.589               |
| 110.5 × 65.3 × 2.6  | 14.58                 | I+II | 13.60                 | I+II | 1.072               |
| 100.6 × 100.6 × 1.5 | 11.17                 | I+II | 10.60                 | I+II | 1.054               |
| 100.3 × 44.2 × 1.4  | 4.80                  | I+II | 5.20                  | I+II | 0.923               |
| 100.2 × 25.8 × 1.58 | 4.10                  | I+II | 3.70                  | I+II | 1.108               |
| 90.6 × 25.8 × 1.2   | 2.90                  | I+II | 2.70                  | I+II | 1.074               |
| 76.5 × 44.3 × 1.4   | 3.88                  | I+II | 3.80                  | I+II | 1.021               |
| 76.3 × 25.5 × 1.58  | 3.35                  | I+II | 3.10                  | I+II | 1.081               |
| 60.2 × 60.0 × 2.2   | 8.40                  | I+II | 8.28                  | I+II | 1.014               |
| 50.7 × 25.7 × 1.0   | 1.10                  | I+II | 0.95                  | I+II | 1.158               |

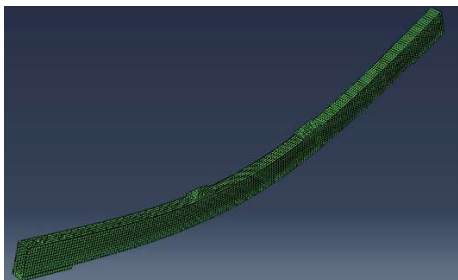


图5 铝合金梁变形图

2 参数化分析

受弯构件稳定系数计算公式一般是以可靠的数据点为基础,通过拟合的方法来求出。为保证拟合精度,用于拟合的数据点应尽可能多。但做试验代价相对较高,因此本文采用经验证的有限元模型来模拟试验过程,以获得尽可能多的数据点。

本节采用 Abaqus 软件分析了 10 根 7A04 高强铝合金矩形管梁的稳定性能,包含 2 种截面尺寸,长细比范围为 15~150。有限元模型模拟的单元类型、边界条件和加载方法均与前文相同,材料属性见表 3<sup>[17]</sup>。有限元模型模拟构件的几何参数见表 4,模拟试件的稳定承载力见表 5。

3 铝合金抗弯承载力计算公式

铝合金受弯构件承载力  $M$  计算式为:

$$M=\varphi_bW_{ex}f \tag{3}$$

式中: $\varphi_b$  为受弯构件的整体稳定系数,可以根据下述几种设计规范计算; $f$  为钢材的抗拉、抗压和抗弯强度设计值; $W_{ex}$  为对强轴受压边缘的有效截面模量。

表3 7A04 铝合金材料属性<sup>[17]</sup>

| $E/\text{MPa}$ | $f_{0.2}/\text{MPa}$ | $f_u/\text{MPa}$ | $n$   |
|----------------|----------------------|------------------|-------|
| 72 035         | 513.4                | 583.7            | 33.75 |

表4 有限元模型模拟矩形管构件几何尺寸

| 试件编号       | 长细比     | 边长 $b/\text{mm}$ | 高度 $h/\text{mm}$ | 厚度 $t/\text{mm}$ | 截面面积 $/\text{mm}^2$ | 回转半径 $/\text{mm}$ | 长度 $L/\text{mm}$ |
|------------|---------|------------------|------------------|------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| □-L400-1   | 14.378  | 70               | 100              | 5                | 1 600               | 27.8              | 400              |
| □-L800-2   | 28.760  | 70               | 100              | 5                | 1 600               | 27.8              | 800              |
| □-L1200-3  | 43.130  | 70               | 100              | 5                | 1 600               | 27.8              | 1 200            |
| □-L1600-4  | 57.510  | 70               | 100              | 5                | 1 600               | 27.8              | 1 600            |
| □-L2000-5  | 71.890  | 70               | 100              | 5                | 1 600               | 27.8              | 2 000            |
| □-L2400-6  | 86.270  | 70               | 100              | 5                | 1 600               | 27.8              | 2 400            |
| □-L2800-7  | 100.650 | 70               | 100              | 5                | 1 600               | 27.8              | 2 800            |
| □-L3200-8  | 115.020 | 70               | 100              | 5                | 1 600               | 27.8              | 3 200            |
| □-L3600-9  | 129.400 | 70               | 100              | 5                | 1 600               | 27.8              | 3 600            |
| □-L4000-10 | 143.780 | 70               | 100              | 5                | 1 600               | 27.8              | 4 000            |

表5 有限元模型模拟分析结果

| 长细比     | 长度 $L/\text{mm}$ | $F_{\text{FEA}}/\text{kN}$ | $\varphi$ |
|---------|------------------|----------------------------|-----------|
| 14.378  | 400              | 138.117                    | 0.977     |
| 28.760  | 800              | 57.698                     | 0.952     |
| 43.130  | 1 200            | 28.021                     | 0.727     |
| 57.510  | 1 600            | 20.816                     | 0.707     |
| 71.890  | 2 000            | 14.187                     | 0.635     |
| 86.270  | 2 400            | 8.300                      | 0.450     |
| 100.650 | 2 800            | 7.040                      | 0.448     |
| 115.020 | 3 200            | 5.960                      | 0.435     |
| 129.400 | 3 600            | 4.071                      | 0.336     |
| 143.780 | 4 000            | 3.890                      | 0.327     |

3.1 《钢结构设计规范》(GB/T 50017—2017)

受弯构件的整体稳定系数  $\varphi_b$  计算式为:

$$\varphi_b=\frac{4\,320}{\lambda_y^2}\frac{Ah}{W_x}\sqrt{1+(\frac{\lambda_y t_1}{4.4h})^2}\cdot\frac{235}{f_y} \tag{4}$$

式中: $A$  为梁截面面积; $h$  为梁截面高度; $\lambda_y$  为沿弱轴  $y$  方向的长细比; $W_x$  为沿强轴  $x$  方向的抗弯模量; $t_1$  为梁截面厚度; $f_y$  为钢材的屈服强度。

整体稳定系数  $\varphi_b$  是按弹性稳定理论求得的。研究证明,当求得的  $\varphi_b>0.6$  时,梁已经进入非弹性工作阶段,整体稳定临界应力有明显的降低,因此采用下式求得的  $\varphi_b'$  代替  $\varphi_b$  进行梁的整体稳定计算:

$$\varphi_b'=1.07-\frac{0.282}{\varphi_b} \tag{5}$$

3.2 《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)

对于单轴或双轴对称截面(包括反对称截面)的简支梁,当绕对称轴( $x$  轴)弯曲时,其整体稳定系数

$\varphi_{bx}$  计算式为:

$$\varphi_{bx}=\frac{4\ 320}{\lambda_y^2}\frac{Ah}{W_x}\xi_1(\sqrt{\eta^2+\eta+\zeta})\cdot(\frac{235}{f_y})\quad(6)$$

式中: $\eta=2e_a\xi_2/h$ ; $\zeta=\frac{4I_w}{h^2I_y}+\frac{0.165I_t}{I_y}(\frac{l_0}{h})^2$ ;  $\xi_1$ 、 $\xi_2$  均为计算受弯构件整体稳定系数时采用的系数; $I_w$  为毛截面扇形惯性矩; $I_y$  为沿  $y$  轴方向的毛截面惯性矩; $I_t$  为毛截面抗扭惯性矩。

3.3 《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)

我国现行的《铝合金结构设计规范》是我国第 1 部关于铝合金结构的国家标准,该规范于 2007 年颁布,2008 年开始实施。受弯构件的整体稳定系数  $\varphi_b$  计算式为:

$$\varphi_b=\frac{1+\eta_b+\bar{\lambda}^2}{2\bar{\lambda}^2}-\sqrt{(\frac{1+\eta_b+\bar{\lambda}^2}{2\bar{\lambda}^2})^2-\frac{1}{\bar{\lambda}^2}}\quad(7)$$

式中: $\bar{\lambda}$  为受弯构件的弯扭稳定相对长细比; $\eta_b$  是与长细比有关的等效偏心率,综合考虑初弯曲、初偏心等多种初始缺陷的影响, $\eta_b=\alpha_b(\bar{\lambda}-\bar{\lambda}_{0b})$ ,其中的  $\alpha_b$ 、 $\bar{\lambda}_{0b}$  为计算受弯构件整体稳定系数时采用的修正系数,对于弱硬化合金, $\alpha_b=0.2$ , $\bar{\lambda}_{0b}=0.36$ ,对于强硬化合金, $\alpha_b=0.25$ , $\bar{\lambda}_{0b}=0.30$ 。

3.4 各规范计算值与本文有限元模拟值对比

本文将按照各规范计算的稳定系数与有限元稳定系数模拟值进行了对比,其受弯构件的长细比  $\lambda$  与稳定系数  $\varphi_b$  的关系图见图 6;各规范稳定系数计算值与有限元稳定系数模拟值的对比见表 6。由图 6 可知,整体上,除了钢结构设计规范的稳定系数计算值  $\varphi_{b, \text{钢构}}$  大于有限元稳定系数模拟值  $\varphi_{b, \text{FEA}}$ ,其他各规范的稳定系数计算值均低于有限元稳定系数模拟值。当长细比大于 70 时,铝合金结构设计规范的稳

定系数计算值  $\varphi_{b, \text{铝构}}$  与有限元稳定系数模拟值几乎重合,且大于冷弯薄壁型钢结构技术规范的稳定系数计算值  $\varphi_{b, \text{薄壁}}$ ,而钢结构设计规范稳定系数计算值均大于其他规范稳定系数计算值。在中等长细比范围内,各规范稳定系数计算值稍有差别,有限元稳定系数模拟值均大于各规范稳定系数计算值;当长细比小于 50 时,各规范稳定系数计算值差别较小,有限元稳定系数模拟值均大于各规范的稳定系数计算值。

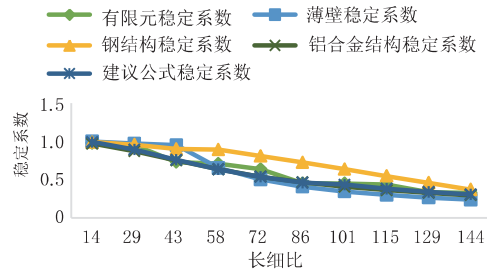


图 6 受弯构件的长细比与稳定系数的关系图

4 建议计算公式

由表 6 可知,各规范的稳定系数计算式均不能很好地预测 7A04 铝合金矩形管受弯构件的稳定系数。目前《铝合金结构设计规范》也仅给出了 6xxx 系列、5xxx 系列和 3xxx 系列铝合金构件的受弯稳定系数,并没有给出 7A04 铝合金矩形管梁弯曲稳定承载力的计算方法。为此,本文提出了更适用于 7A04 铝合金矩形管梁受弯构件稳定承载力的计算公式。

本文以《铝合金结构设计规范》稳定系数—长细比曲线的基本数学模型,采用非线性最小二乘法对本文有限元模拟结果进行拟合,得出等效偏心率  $\eta_b$  表达式中的修正系数如下: $\alpha_b=0.25$ , $\bar{\lambda}_{0b}=0.50$ 。将这 2 个系数代入  $\eta_b$  表达式中,可得到本文建议计算公式。据此算出的 7A04 铝合金矩形管受弯构件的稳定

表 6 各规范计算值与有限元模拟值的对比

| 编号         | 长细比     | $\varphi_{b, \text{FEA}}$ | $\varphi_{b, \text{薄壁}}$ | $\frac{\varphi_{b, \text{薄壁}}}{\varphi_{b, \text{FEA}}}$ | $\varphi_{b, \text{钢构}}$ | $\frac{\varphi_{b, \text{钢构}}}{\varphi_{b, \text{FEA}}}$ | $\varphi_{b, \text{铝构}}$ | $\frac{\varphi_{b, \text{铝构}}}{\varphi_{b, \text{FEA}}}$ | $\varphi_{b, \text{propos}}$ | $\frac{\varphi_{b, \text{propos}}}{\varphi_{b, \text{FEA}}}$ |
|------------|---------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| □-L400-1   | 14.378  | 0.977                     | 0.997                    | 1.020                                                    | 0.989                    | 1.01                                                     | 0.969                    | 0.992                                                    | 0.989                        | 1.000                                                        |
| □-L800-2   | 28.760  | 0.952                     | 0.972                    | 1.020                                                    | 0.956                    | 1.00                                                     | 0.869                    | 0.913                                                    | 0.890                        | 0.931                                                        |
| □-L1200-3  | 43.130  | 0.727                     | 0.948 255                | 1.300                                                    | 0.901                    | 1.23                                                     | 0.750                    | 1.030                                                    | 0.757                        | 0.840                                                        |
| □-L1600-4  | 57.510  | 0.707                     | 0.652 449                | 0.923                                                    | 0.890                    | 1.25                                                     | 0.634                    | 0.897                                                    | 0.633                        | 0.711                                                        |
| □-L2000-5  | 71.890  | 0.635                     | 0.499 983                | 0.787                                                    | 0.809                    | 1.27                                                     | 0.538                    | 0.847                                                    | 0.534                        | 0.660                                                        |
| □-L2400-6  | 86.270  | 0.450                     | 0.406 944                | 0.904                                                    | 0.724                    | 1.61                                                     | 0.464                    | 1.030                                                    | 0.459                        | 0.634                                                        |
| □-L2800-7  | 100.650 | 0.448                     | 0.344                    | 0.768                                                    | 0.636                    | 1.42                                                     | 0.406                    | 0.906                                                    | 0.432                        | 0.964                                                        |
| □-L3200-8  | 115.020 | 0.435                     | 0.298 463                | 0.686                                                    | 0.547                    | 1.26                                                     | 0.361                    | 0.829                                                    | 0.379                        | 0.871                                                        |
| □-L3600-9  | 129.400 | 0.336                     | 0.263 812                | 0.785                                                    | 0.457                    | 1.36                                                     | 0.325                    | 0.967                                                    | 0.338                        | 1.006                                                        |
| □-L4000-10 | 143.780 | 0.327                     | 0.236 537                | 0.723                                                    | 0.368                    | 1.12                                                     | 0.295                    | 0.902                                                    | 0.305                        | 0.933                                                        |

系数  $\varphi_{b, \text{propose}}$  及其与有限元模拟值  $\varphi_{b, \text{FEA}}$  的对比也列于表 6。从表 6 可以看出,对 7A04 高强铝合金矩形管梁受弯稳定系数的预测较为准确。

## 5 结 语

(1)有限元模型的破坏形态、荷载-位移曲线中的极限承载力均与试验结果相吻合,说明本文建立的有限元模型可以准确模拟 7A04 铝合金矩形管梁的受弯稳定性能。

(2)对于较小长细比的受弯构件,长细比越大,受弯构件的稳定系数越小;铝合金结构设计规范的稳定系数计算值与有限元模拟值较为接近,但基本小于有限元模拟值。

(3)根据试验数据与有限元模拟值,提出了受弯承载力稳定系数的简化公式,得出等效偏心率  $\eta_b$  表达式中的修正系数如下: $\alpha_b=0.25$ ,  $\bar{\lambda}_{0b}=0.50$ 。

### 参考文献:

- [1] MOEN L A, DE MATTEIS G, HOPPERSTAD O S, et al. Rotational capacity of aluminium beams under moment gradient. II: Numerical simulations[J]. J Struct Eng ASCE, 1999,125(8):921-929.
- [2] DE MATTEIS G, MOEN L A, LANGSETH M, et al. Cross-sectional classification for aluminium beams: A parametric study[J]. J Struct Eng, ASCE, 2001,127(3):271-279.
- [3] DE MATTEIS G, LANDOLFO R, MANGANIello M, et al. Inelastic behaviour of I-shaped aluminium beams: Numerical analysis and cross-sectional classification[J]. Comput Struct, 2004,82(23-26): 2157-2171.
- [4] MANGANIello M, DE MATTEIS G, LANDOLFO R. Inelastic flexural strength of aluminium alloy structures[J]. Eng Struct, 2006,28(4): 593-608.
- [5] EBERWIEN U, VALTINAT G. The fullness method: A direct procedure for calculation of the bending moment of a symmetrical aluminium cross section [C]//Proceedings of the Eighth International Conference in Aluminium (INALCO).Munich, Germany: [s.n.], 2001: 3.3.1-10.
- [6] SCHAFER B W, PEKÖZ T. Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions [C]// Proceeding of 14th Int Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. Rolla, Mo, USA: [s.n.], 1998:137-144.
- [7] ZHU J H, YOUNG B. Design of aluminum alloy flexural members using direct strength method[J]. J Struct Eng, ASCE, 2009,135(5): 558-566.
- [8] GB/T 50017—2017: 钢结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社, 2017.
- [9] GARDNER L, ASHRAF M. Structural design for non-linear metallic materials[J]. Eng Struct, 2006,28(6):926-934.
- [10] KIM Y, PEKÖZ P. Ultimate flexural strength of aluminum sections [J]. Thin-Wall Struct, 2010,48(10-11):857-865.
- [11] GARDNER L. The continuous strength method[J]. Proc Inst Civ Engrs, Struct Build, 2008,161(3):127-133.
- [12] GARDNER L, WANG F, LIEW A. Influence of strain hardening on the behaviour and design of steel structures[J]. Int J Struct Stab Dyn, 2011,11(5):855-875.
- [13] ASHRAF M, YOUNG B. Design formulations for non-welded and welded aluminium columns using continuous strength method [J]. Eng Struct, 2011,33(12):3197-3207.
- [14] AFSHAN S, GARDNER L. The continuous strength method for structural stainless steel design[J]. Thin-Wall Struct, 2013,68: 42-49.
- [15] SU M, YOUNG B, GARDNER L. Testing and design of aluminium alloy cross sections in compression[J]. J Struct Eng, ASCE, 2014, 140(9): 04014047.
- [16] 龚文志. 铝合金管(混凝土)受弯构件的静力性能试验研究[D].泉州:华侨大学, 2016.
- [17] 王衬心. 7A04 铝合金圆管柱轴压稳定性能研究[D].天津:天津大学, 2019.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)