

7A04 铝合金矩管压弯构件稳定性有限元分析

刘佳钰¹, 吴沛峰¹, 张成¹, 胡耀伟², 张若瑜^{2,3}

[1.中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津市 300074; 2.天津大学建筑工程学院, 天津市 300072;
3.滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津市 300072]

摘要:为研究7A04铝合金矩管压弯构件稳定性承载力、失稳模态和变形性能,通过Abaqus软件建立有限元模型,并与已有试验数据进行对比,验证了有限元模型的可行性。在此基础上,建立了7A04铝合金矩管压弯构件的有限元模型,并进行参数分析,研究长细比、偏心率和偏心方向对压弯构件稳定性承载力和失稳模态的影响。结果表明,绕弱轴偏心的压弯构件全部发生平面内失稳,绕强轴偏心的压弯构件发生平面内失稳和平面外失稳2种模态;数值计算得到的稳定承载力相关曲线与按《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)公式计算的稳定承载力相关曲线对比的结果表明,公式计算值保守,不适用于7A04铝合金矩管压弯构件,需要进行改进与修正。

关键词:7A04 铝合金矩管;压弯构件;有限元分析;稳定承载力;失稳模态

中图分类号:U444

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2021)02-0177-04

0 引言

铝合金材料具有耐腐蚀、密度小、加工性能好、维护费用低和易于再生等优点,早在20世纪初就已经应用于国外的桥梁结构,因此国外对铝合金构件稳定性方面的研究较为成熟,各国规范比较完善。进入21世纪,铝合金在国内的桥梁结构中也逐渐得以应用,且多以桁架结构为主。相比于钢和混凝土组合桥梁,铝合金桥梁具有经济美观、施工速度快、防腐性能好、可循环利用等优点。然而目前国内对铝合金压弯构件稳定承载力研究较少,并以6系铝合金为主。郭小农等^[1]进行了6061-T6铝合金偏心受压试验,拟合出了计算三类截面偏压构件弯曲失稳的公式。张铮等^[2-3]对H形截面压弯构件的平面内、平面外承载力进行研究,提出了压弯构件稳定承载力的计算公式。翟希梅等^[4-5]进行了箱形截面和L形截面6082-T6铝合金偏心受压试验,并与中欧规范进行对比,结果表明规范计算公式相对保守,对中国规范L形截面计算公式进行了修正。李剑彬等^[6]对6061-T4铝合金方管压弯构件平面内稳定性进行有限元分析,基于参数化分析建议对规范中计算公式的修正系数进行了修改。王元清等^[7-8]对7A04铝合金L形截面柱和大截面角形柱进行轴压整体稳定性能试验研究,结果表明我国规范过多考

虑局部屈曲对构件的影响,从而低估了其稳定承载力。现阶段对于铝合金桥梁的设计,《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)推荐的5系和6系铝合金,其设计强度不超过200 MPa,低于Q235钢材的设计强度,材料强度较低。作为Al-Zn-Mn-Cu超硬铝系高强度合金,7A04高强铝合金抗拉强度可达600 MPa,接近Q420钢材的材料强度,但密度仅是钢材的1/3。因此,7A04高强铝合金可以有效减小构件截面,减轻结构自重,更符合桥梁结构的材料要求。目前仅有对7A04轴压构件稳定性的研究,缺少对7A04压弯构件的研究。本文以7A04铝合金矩管为研究对象,建立偏心受压有限元模型,分析初始缺陷幅值对于模型稳定承载力的影响,并通过已有轴压试验对有限元模型进行验证。在此基础上,考虑长细比、高宽比和荷载偏心率的不同进行参数化分析,获取压弯构件稳定承载力模拟数据,并与规范进行对比,对规范中压弯构件稳定承载力计算公式进行修正。

1 有限元模拟

1.1 建立有限元模型

基于王衬心的7A04轴压稳定性试验^[9]建立有限元模型,以两端铰接的圆管为研究对象,截面直径为70 mm和75 mm,厚度为5 mm。材料本构关系采用Ramberg-Osgood模型^[10],即 $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{f_{0.2}} \right)^n$,式中: ε 为应变; σ 为应力; E 为弹性模量; $f_{0.2}$ 为屈服强

收稿日期:2020-07-20

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。

度; n 为应变硬化指数。Ramberg- Osgood 模型与材性试验结果吻合较好,适用于描述 7A04 铝合金的本构关系^[11]。其中的 n 以传统两点法确定,即 $n = \ln 2 / \ln(f_{0.2} / f_{0.1})$,式中 $f_{0.1}$ 为以塑性应变 0.1%规定的非比例延伸强度。模型采用 S4R 壳单元,加载方式采用位移加载,非线性屈曲分析时引入初始缺陷,采用通用分析步进行分析,得到稳定承载力。

1.2 验证有限元模型

为验证有限元模型,选用文献[9]提供的 9 个 7A04 铝合金圆管轴压试验数据进行对比验证。采用文献中提供的材性试验数据,弹性模量取 72 195.5 MPa、屈服强度为 505.61 MPa、极限强度为 572.25 MPa、应变硬化指数为 33.75。

图 1 为有限元分析结果与文献[9]中试件破坏形态的比较,结果表明有限元模型破坏形态为整体弯曲失稳,与试验结果相吻合。图 2 为数值计算结果与文献[9]中试验荷载 - 位移曲线的对比,可以看出数值计算的荷载 - 位移曲线与试验曲线吻合良好。表 1 为数值计算稳定承载力与试验测得的稳定承载力的比较。由表 1 可见,两者的平均误差为 0.92%,最大相对误差为 4.07%。通过以上对比可知,两者结果相近,表明有限元模型模拟 7A04 铝合金圆管轴压试验效果良好,建模方法合理,因此可以继续进行 7A04 铝合金方管压弯承载力的有限元分析。

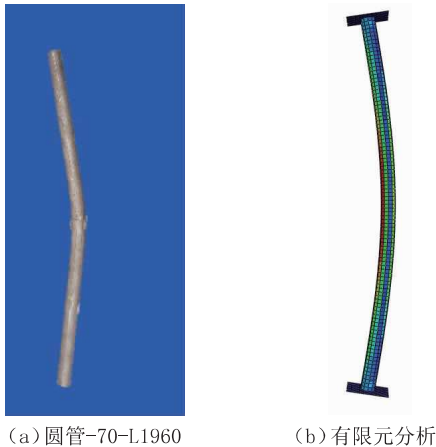


图 1 有限元分析与试验的破坏形态对比

2 参数化分析

由于目前缺乏 7A04-T6 铝合金方管压弯构件的试验结果,合理的数值模拟结果能够为稳定承载力公式提供依据。因此进行参数分析,考虑长细比 λ 、偏心率 e' 和偏心方向的影响,获得相应的数值计算结果。有限元模型的材料属性采用文献[11]中的材性试验结果,研究对象为铝合金挤压型材构件,残余应力影响忽略不计。初始缺陷取 $L/1000$ (涵盖铝

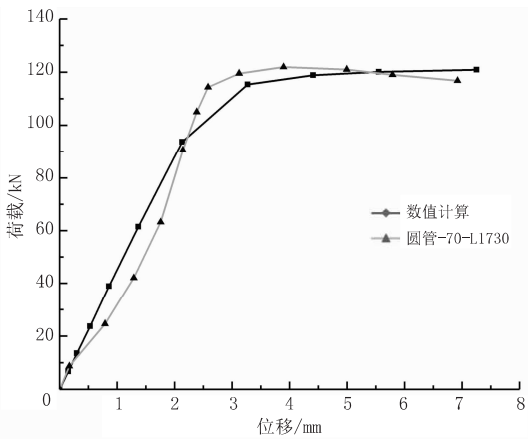


图 2 数值计算与试验荷载 - 位移曲线对比

表 1 数值计算结果与试验承载力对比

试件编号	$E /$ MPa	$f_{0.2} /$ MPa	$L /$ mm	$P_u /$ MPa	$P_e /$ MPa	$\frac{P_u - P_e}{P_u} / \%$
圆管 -70-L1500	72 195.5	505.61	1 500	157.15	159.46	-1.47
圆管 -70-L1730	72 195.5	505.61	1 730	121.95	120.93	0.84
圆管 -70-L1960	72 195.5	505.61	1 960	98.74	94.72	4.07
圆管 -70-L2190	72 195.5	505.61	2 190	77.07	77.91	-1.09
圆管 -75-L370	72 195.5	505.61	370	625.72	623.32	0.38
圆管 -75-L870	72 195.5	505.61	870	481.89	462.63	4.00
圆管 -75-L1365	72 195.5	505.61	1 365	236.41	238.62	-0.93
圆管 -75-L1860	72 195.5	505.61	1 860	133.58	131.47	1.58
圆管 -75-L2360	72 195.5	505.61	2 360	83.4	82.65	0.90
平均误差						0.92

注: P_u 为实测稳定承载力; P_e 为数值计算稳定承载力; L 为构件长度。

合金构件的几何缺陷和力学缺陷)^[3],符合《铝合金建筑型材》(GB/T 5237—2017)中的要求,构件参数设置见表 2。

表 2 构件参数

截面 形状	截面尺寸 /mm	L / mm	λ_x	λ_y	偏心率 e'	
					绕强轴 $2e/h$	(绕弱轴 $2e/b$)
矩形	100 × 70 × 5	740	26	20	0.1	1.0
		1 480	53	40	0.2	2.0
		2 220	79	60	0.4	3.0
		2 960	106	80	0.6	6.0
		3 700	133	100	0.8	9.0

注: λ_x 为弱轴长细比; λ_y 为强轴长细比; e 为偏心距; h 为截面高度,100 mm; b 为截面宽度,70 mm。

初始弯曲方向均为绕弱轴弯曲。由于压弯构件存在轴力 N 和弯矩 M , 两者相互关联, 需要研究相关曲线的变化。不同长细比下的绕弱轴偏心的相关曲线见图 3, 不同长细比下绕强轴偏心的相关曲线见图 4。图中纵坐标 $y=N/(\varphi N_y)$, $N_y=f_{0.2}A$; 横坐标 $x=M/(\varphi_b M^*)$, $M^*=f_{0.2}W_{lx}$, 其中 N 为数值计算的极限轴力; M 为极限弯矩; A 为截面面积; W_{lx} 为弯矩作用平面内的弹性界面模量; φ 为轴心受压稳定系数; φ_b 为受弯构件整体稳定系数。结果表明: 矩形构件绕弱轴偏心时发生平面内失稳, 相关曲线近似于直线; 矩形构件绕强轴偏心, $\lambda_y=20$ 时全部发生平面内失稳; 当 $\lambda_y=40$ 时, 偏心率 $e'<0.2$ 发生平面内失稳, $e'>0.2$ 发生平面外失稳; 当 $\lambda_y=60$ 时, $e'<1.0$ 发生平面内失稳, $e'>1.0$ 发生平面外失稳; 当 $\lambda_y=80$ 时, $e'<2.0$ 发生平面内失稳, $e'>2.0$ 发生平面外失稳; 当 $\lambda_y=100$ 时, $e'<6.0$ 发生平面内失稳, $e'>6.0$ 发生平面外失稳。 λ_y 在 $[20, 60]$ 范围内, 相关曲线变化明显; λ_y 在 $[80, 100]$ 范围内, 相关曲线基本重合。

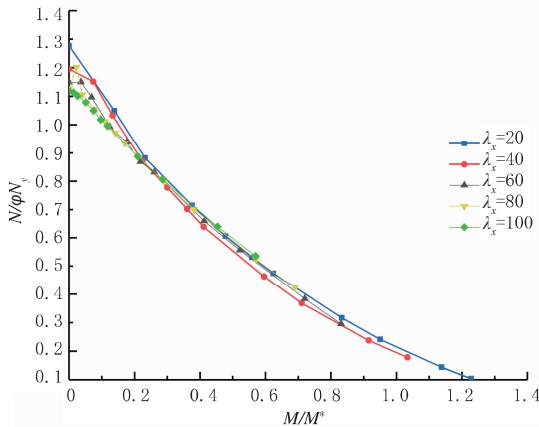


图3 构件绕弱轴偏心相关曲线

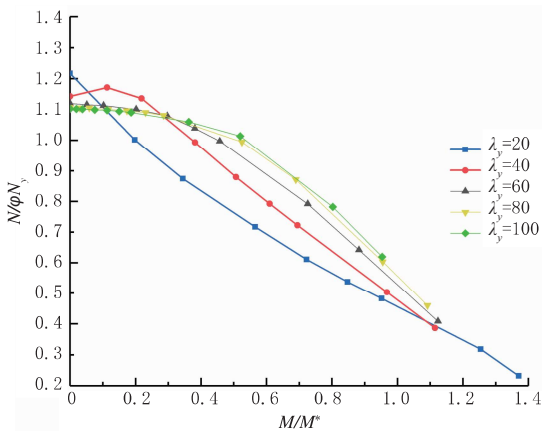


图4 构件绕强轴偏心相关曲线

3 压弯构件稳定承载力计算方法

3.1 《铝合金结构设计规范》计算方法

《铝合金结构设计规范》(GB 50429—2007)(以

下简称《规范》)中压弯构件稳定性承载力计算公式为:

$$\text{平面内: } \frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{lex} (1 - \eta_1 N/N'_{Ex})} \leq f \quad (1)$$

$$\text{平面外: } \frac{N}{\varphi_y A} + \frac{\eta M_x}{\varphi_b W_{lex}} \leq f \quad (2)$$

式中: φ_x 为弯矩作用平面内的轴心受压构件稳定计算系数, 本文研究矩形截面, 由式(3)确定; φ_y 为弯矩作用平面外的轴心受压构件稳定计算系数, 本文研究矩形截面, 由式(3)确定; φ_b 为受弯构件整体稳定性系数, 对于矩形截面, $\varphi_b=1.0$; N'_{Ex} 为参数, $N'_{Ex}=\pi^2 EA/(1.2\lambda_x^2)$; η_1 为合金影响系数, 对于弱硬化合金取 0.75, 强硬化合金取 0.9, 本文取 0.75; η 为截面影响系数, 闭口截面取 0.7, 开口截面取 1.0, 本文取 0.7; γ_x 为截面塑性发展系数, 对于矩形构件 $\gamma_x=1.0$; W_{lex} 为弯矩作用平面内的有效截面模量; β_{mx} 为等效弯矩系数, 本文取 1.0; f 为铝合金材料抗压承载力设计值, $f=f_{0.2}/\gamma_o$, 其中 γ_o 为抗力分项系数, 本文取 1.0。

矩形截面为双轴对称截面, 故稳定计算系数由式(3)进行计算。

$$\overline{\varphi}_x(\overline{\varphi}_y) = \beta_e \beta_{hdz} \varphi \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{1}{2\lambda^2} \{ (1 + \eta' + \bar{\lambda}^2) - [(1 + \eta' + \bar{\lambda}^2)^2 - 4\bar{\lambda}^2]^{1/2} \} \quad (4)$$

式中: β_e 为考虑局部屈曲影响系数, 本文取 1.0; β_{hdz} 为焊接缺陷影响系数, 本文取 1.0; $\bar{\lambda}$ 为正则化长细比; η' 为构件几何缺陷系数, $\eta'=\alpha(\bar{\lambda}-\bar{\lambda}_0)$, 本文 $\alpha=0.2$, $\bar{\lambda}_0=0.15$ 。

3.2 《规范》计算值与数值模拟值的对比

有限元分析结果表明: 矩形铝合金压弯构件绕弱轴发生平面内失稳, 平面内稳定承载力低于平面外稳定承载力, 用式(1)进行计算; 绕强轴的构件存在平面内失稳与平面外失稳, 稳定承载力采用式(1)与式(2)中较小值进行计算。将有限元分析结果与《规范》计算结果进行比较, 平面内公式对比结果见图 5, 平面外公式对比结果见图 6。由图 5、图 6 可知, 数值模拟值全部位于《规范》公式计算值上方, 表明《规范》中压弯构件建议计算公式对于 7A04-T6 铝合金压弯构件计算结果相对保守, 适用性较差, 需要进行修正与改进。

4 结论

(1) 利用 Abaqus 软件, 验证了有限元模型的可

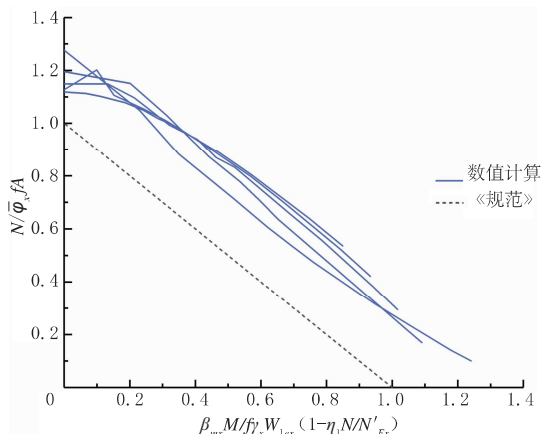


图 5 平面内公式对比结果

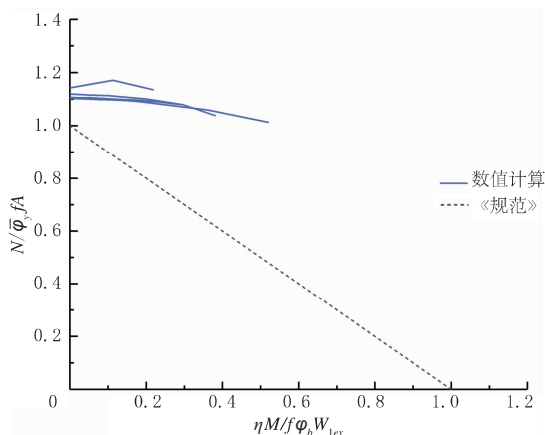


图 6 平面外公式对比结果

行性,在此基础上分析出 7A04-T6 铝合金矩形压弯构件稳定承载力、失稳模态和变形性能。

(2)进行参数分析,得到压弯构件绕弱轴偏心和绕强轴偏心的相关曲线,在不同长细比下绕弱轴偏心的相关曲线基本重合,绕强轴偏心的相关曲线在 $\lambda < 60$ 时变化明显,在 $\lambda > 60$ 时基本重合。压弯构件绕弱轴偏心全部发生平面内失稳;对于绕强轴偏心

小长细比的压弯构件,在小偏心的情况下会发生平面外失稳,而大长细比构件在大偏心的情况下也会发生平面外失稳。

(3)将数值计算结果与《规范》计算结果进行对比得到相关曲线,结果表明数值计算结果高于《规范》计算结果。说明《规范》建议公式保守,不适用于 7A04-T6 铝合金压弯构件的计算,需要进行改进和修正。

参考文献:

- [1] 郭小农,沈祖炎,李元齐,等.铝合金偏心受压构件理论和试验研究[J].建筑结构学报,2007,28(6):136-146.
- [2] 张铮,张其林. H 形截面铝合金压弯构件平面内稳定承载力的试验及理论研究[J].建筑结构学报,2006,27(5):9-15.
- [3] 张铮,张其林. H 型铝合金压弯构件平面外稳定承载力试验及理论研究[J].建筑结构,2010,40(6):110-113,102.
- [4] 翟希梅,孙丽娟,赵远征. 6082-T6 铝合金箱形与 L 形截面压弯构件稳定承载力研究[J].建筑结构学报,2015,36(9):73-82.
- [5] 翟希梅,孙丽娟,赵远征.高强铝合金压弯构件稳定承载力中欧规范对比[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(12):1-8.
- [6] 李剑彬,张铮,郑秀梅,等. 6061-T4 铝合金方管压弯构件平面内稳定性研究[J].福建工程学院学报,2016,14(6):538-542.
- [7] 王元清,王中兴,胡晓光,等.大截面 7A04 高强铝合金角形柱轴压整体稳定试验研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2016,49(9):936-943.
- [8] 王元清,王中兴,胡晓光,等.7A04 高强铝合金 L 形截面柱轴压整体稳定性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(6):174-182.
- [9] 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.
- [10] RAMBERG W, OSGOOD W R. Description of stress-strain curve by three parameters[S]. Washington D C: National Advisory Committee for Aeronautics, 1943.
- [11] 李进军,丁永君,王衬心,等. 7A04-T6 铝合金圆管的材性试验和本构模型研究[J].钢结构,2019,34(12):35-39.

《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