

7A04-T6 方形铝合金管混凝土柱偏压性能研究

张松, 郭毅, 熊伟

(中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 利用ABAQUS软件建立方形铝合金管混凝土柱在轴压及偏压荷载下的有限元分析模型, 通过对比5个矩形铝合金管混凝土柱的轴压及偏压试验结果来验证该数值分析模型的准确性, 在此基础上对7A04-T6方形铝合金管混凝土柱的偏压性能进行研究, 分析了模型破坏模式及长细比、偏心率和混凝土强度对偏压性能的影响, 同时将构件的极限承载力与各国规范进行比较。结果表明: 在偏压荷载作用下, 7A04-T6方形铝合金管混凝土柱发生失稳破坏; 长细比和核心混凝土强度与偏压极限承载力近似呈线性关系, 偏心率与极限承载力呈非线性关系, 构件延性和长细比与偏心率呈正相关; 现有中国规范CECS 159—2004和美国规范AISC的规范计算值较为保守; 最后通过回归分析, 提出了7A04-T6方形铝合金管混凝土柱是偏压承载力计算公式。

关键词: 有限元分析; 铝合金管混凝土柱; 偏压性能; 极限承载力

中图分类号: U444

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)02-0273-06

Study on Eccentric Compression Performance of 7A04-T6 Square CFAT Columns

ZHANG Song, GUO Yi, XIONG Wei

(Guiyang Survey and Design Research Institute Co., Ltd., China Power Construction Group, Guizhou 550081, China)

Abstract: ABAQUS software is used to establish the finite element model of square concrete-filled aluminum alloy tubular (CFAT) columns under axial compression and eccentric compression. The accuracy of the numerical analysis model is verified by comparing the axial compression and eccentric compression test results of 5 rectangular concrete-filled aluminum alloy tubular columns. On this basis, the eccentric compression performance of 7A04-T6 square CFAT columns is studied. The effects of the model failure mode, slenderness ratio, eccentricity and concrete strength on the eccentric compression performance are analyzed. At the same time, the ultimate bearing capacity of the components is compared with the codes of various countries. The results show that under the action of eccentric compression load, the failure mode of 7A04-T6 square CFAT columns undergoes instability. The slenderness ratio and core concrete strength are approximately linear with the ultimate bearing capacity of eccentric compression. The eccentricity has a nonlinear relationship with the ultimate bearing capacity. The ductility and slenderness ratio are positively correlated with eccentricity. However, the calculated values of the existing Chinese code CECS 159—2004 and the American code AISC are conservative. Finally, through regression analysis, a formula for calculating the eccentric compression bearing capacity of 7A04-T6 square CFAT columns is proposed.

Keywords: finite element analysis; concrete-filled aluminum alloy tubular (CFAT) columns; eccentric compression performance; ultimate bearing capacity

0 引言

铝合金具有轻质、防锈、美观等优点, 迄今为止, 已广泛应用于各项建筑工程中^[1-2], 但铝合金的弹性模量较低, 在使用过程中容易发生失稳^[3]。故可参照钢管混凝土柱, 在铝合金管中浇筑混凝土, 以提高

铝合金管的稳定性。

国内外学者针对铝合金管混凝土柱性能开展了一系列的研究, 曾翔等^[4]及李翔宇等^[5]对圆形铝合金管混凝土柱的轴压性能进行了研究, 分析了混凝土强度对轴压性能的影响。Zhou F. 等^[6-7]采用试验研究和数值模拟相结合的方法对6061-T6圆形铝合金管混凝土柱的轴压性能进行了研究, 分析了圆形铝合金管混凝土短柱在受压时的轴向变形规律, 总结了荷载-轴向位移关系, 并提出了短柱的强度计算方法。查晓雄等^[8]分析了高强钢、不锈钢和铝合金

收稿日期: 2024-03-21

基金项目: 中国电力建设集团有限公司资助项目(XNZ/2020/KK-1-5)

作者简介: 张松(1997—), 男, 工学硕士, 助理工程师, 从事结构设计与研究。

管混凝土短柱轴压强度,提出了铝合金管混凝土柱的组合强度设计公式。宫永丽等^[9]通过数值模拟研究了铝合金管混凝土长柱的轴压稳定系数,根据模拟结果,提出了不同构件轴压稳定系数计算公式。刘玉强等^[10]分析了圆形铝合金管混凝土柱的轴压性能,并对拟混凝土理论、拟铝合金理论和统一理论进行了研究。李翔宇等^[11]参考钢管混凝土柱轴压计算公式提出了7075铝合金管混凝土柱轴压承载力计算公式。曾翔等^[12]分析了套箍系数、径厚比、材料强度对圆形铝合金管混凝土短柱的轴压性能影响,并通过回归分析建立了组合抗压强度的计算公式。王伟^[13]通过圆形和矩形铝合金管混凝土长柱的轴压试验,分析了长细比、含铝率和核心混凝土强度的影响,将试验结果与现有钢管混凝土规范进行对比,确定了铝合金管混凝土柱轴压和偏压极限承载力计算方法。Bin R.等^[14]通过对7A04-T6圆形铝合金管混凝土柱进行偏压分析,确定了试件的偏压破坏模式,并推导出偏压极限承载力的计算表达式。

综上所述,以往研究主要集中于圆形铝合金管混凝土柱的轴压及偏压性能,对于矩形铝合金管混凝土柱的研究尚处于初期阶段。同时由于7A04-T6铝合金的强度较其它系列铝合金较高,因此,本研究通过ABAQUS数值模拟的方法对7A04-T6方形铝合金管混凝土柱的偏心受压性能开展研究,以为后续工程应用提供参考。

1 有限元模型建立

1.1 材料本构关系

本研究利用ABAQUS软件数值模拟方形铝合金管混凝土柱的偏压试验,为使模型更加吻合实际情况,建立的有限元模型考虑了材料的非线性。现阶段铝合金常用的本构模型主要有^[15]:Ramberg-Osgood模型、Baehre模型和Mazzolani模型,其中Ramberg-Osgood模型应用范围广,表达式简单易懂、方便计算,其应力(σ)-应变(ε)关系的表达式如式(1)所示。

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_0 \left(\frac{\sigma}{f_{\varepsilon_0}} \right)^n \quad (1)$$

式中: E 为铝合金弹性模量,MPa; f_{ε_0} 为弹性极限,MPa; ε_0 为 f_{ε_0} 对应的塑性应变; n 为应变硬化指数。

相比于铝合金材料,混凝土的受压和受拉性能存在较大差异,本构关系更加复杂,同时核心混凝土在外金属管的约束下,应力状态更异于常规状态。曾翔等^[12]通过研究,提出了铝合金管核心混凝土的

受压本构模型,其应力-应变曲线如图1所示,计算公式如式(2)所示。

$$\sigma = \begin{cases} \left[\frac{2\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right] f'_c, & \varepsilon \leq \varepsilon_{c0} \\ f'_c, & \varepsilon_{c0} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cc} \\ f_r + (f'_c - f_r) \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{cc}}{\alpha} \right)^{1.2} \right], & \varepsilon > \varepsilon_{cc} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f'_c 为混凝土抗压强度,MPa; f_r 为混凝土受压破坏后最终压应力,MPa; ε_{cc} 和 ε_{c0} 分别为混凝土应力达到抗压强度时的应变和混凝土即将发生破坏时的应变。

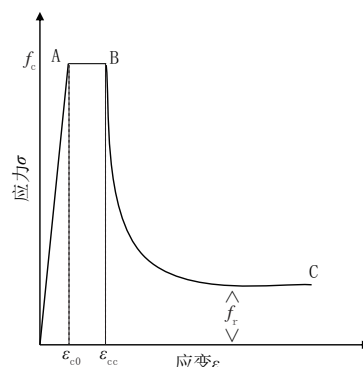


图1 约束混凝土等效受压应力-应变曲线

混凝土在受拉时的应力-应变关系采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[16]中的模型,按式(3)计算。

$$\sigma = (1 - d_1) E_c \varepsilon \quad (3)$$

式中: d_1 为混凝土单轴受拉损伤因子; E_c 为混凝土弹性模量,MPa。

1.2 有限元模型

本研究构建的有限元模型如图2所示。由于铝合金管的厚度相比其余两个方向的尺寸较小,为了提高计算效率,铝合金管采用了S4R壳单元;为准确分析复杂应力状态下核心混凝土的应变,混凝土采用了C3D8R三维实体单元。为了对核心混凝土与铝合金管之间的相互作用进行仿真,设置核心混凝土与铝合金管在法向为硬接触,切向为摩擦接触,摩擦系数设置为0.3^[10];同时为了方便施加荷载,在有限元模型的两端添加盖板,核心混凝土与铝合金管均与盖板采用绑定接触;有限元模型底部铰接,顶部仅能发生转动和产生竖向位移,通过在模型顶部施加荷载模拟偏心受压。

在ABAQUS软件中,较小的网格划分会导致计算效率较低,而较大的网格划分又容易导致计算不收敛、数值模拟结果精度较差。由于有限元模型中

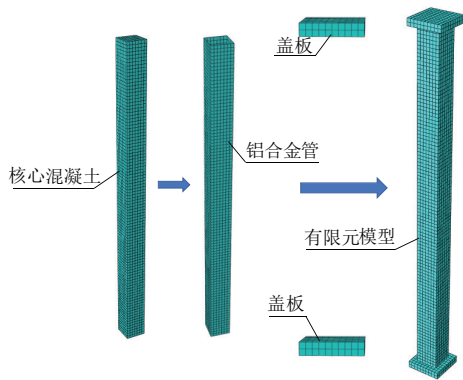


图2 方形铝合金管混凝土柱有限元模型

同时存在铝合金管、混凝土和盖板,构件间相互接触,网格的协调划分对计算的收敛有着重要的影响。通过分析网格尺寸和计算效率的关系,发现网格尺寸为 5 mm 时可以提高计算的效率,同时可以保证计算结果的准确性。

2 有限元模型验证

本研究利用王伟^[13]使用的 6061-T6 方形铝合金

管混凝土柱进行对比验证,包含 5 组试件,通过对这 5 个方形铝合金管混凝土柱试件进行偏压模拟,以确保模型分析的可靠与准确,试件参数与模拟结果如表 1 所示,其中 T_u 为文献中所得试件的极限承载力, F_u 为有限元分析极限承载力。可以看出, F_u/T_u 均近似为 1,表明试件的试验极限承载力与本研究运用有限元分析得到的极限的承载力基本相同。试件壁厚为 6.20 mm 的荷载-跨中挠度关系曲线如图 3 所示,可以看出,王伟通过试验与本研究通过有限元分析得到的竖向荷载-跨中挠度关系曲线的上升段基本吻合,且通过有限元分析得到的竖向荷载-跨中挠度关系曲线下降段的竖向荷载略小于王伟的结果,即表明有限元分析结果与王伟的试验结果基本保持一致。有限元模型的破坏模式如图 4 所示,可以发现模型主要发生失稳破坏,该破坏模式与王伟的试验结果完全吻合。综上所述,可认为对比结果验证了有限元数值模拟方法的准确性。

表 1 方形铝合金管混凝土柱参数

边长/mm	壁厚/mm	柱长/mm	偏心距/mm	混凝土	铝管屈服强度/MPa	T_u /kN	有限元 F_u /kN	F_u/T_u
142	0.86	491.9	0	C30	240	772.9	750.3	0.97
	2.65	1 229.9	14.2	C40		686.2	690.2	1.01
	4.45	1 639.7	28.4	C50		647.6	634.7	0.98
	6.20	2 459.5	42.6	C60		536.5	550.5	1.03
	8.00	3 279.3	56.8	C60		418.9	438.7	1.05

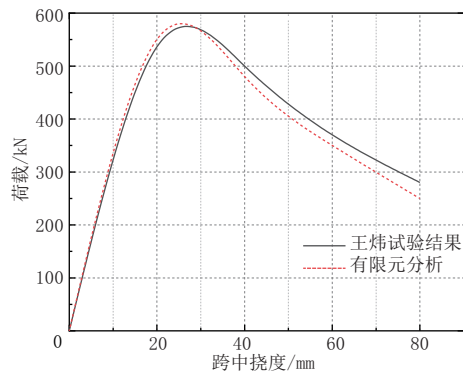


图3 荷载-跨中挠度曲线

3 7A04-T6 方形铝合金管混凝土柱偏压模拟

3.1 7A04-T6 铝合金材料参数

目前针对 7A04-T6 铝合金材料属性的研究较少,李进军等^[17]通过试验测定了 7A04-T6 铝合金的材料属性,其中弹性模量 E 为 72 000 MPa,屈服强度 $f_{0.2}$ 为 520 MPa, f_u 抗拉强度为 600 MPa,应变硬化指数 n 为 33.75,代入式(1)可得到 7A04-T6 铝合金的本构曲线如图 5 所示。

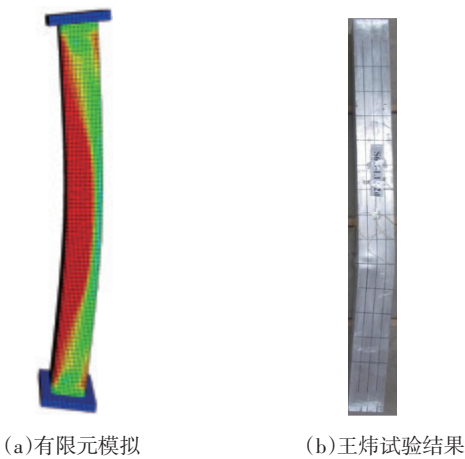


图4 破坏模式对比

3.2 参数化分析

大量研究表明^[8,11],长细比(λ)、偏心距(e)和混凝土强度是影响组合构件轴心受压和偏心受压性能的主要因素。

3.2.1 长细比分析

不同长细比的 7A04-T6 方形铝合金管混凝土柱

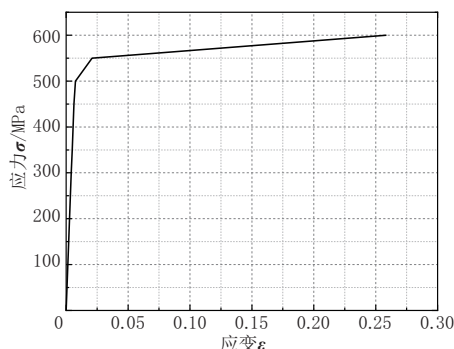
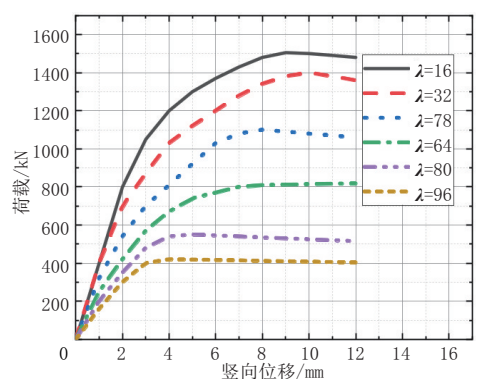
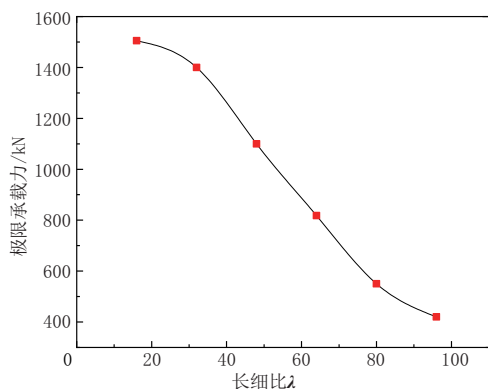


图5 7A04-T6 铝合金应力-应变曲线

在轴心受压下的荷载-竖向位移曲线和极限承载力-长细比的关系曲线如图6所示,其中柱截面尺寸均为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,壁厚为 6 mm ,核心混凝土材料为 C40。由图6(a)可以看出,荷载先随着竖向位移的增大而增大,对于 $\lambda < 48$ 的试件,当荷载达到最大值时,荷载几乎保持不变,而竖向位移急剧增加;对于 $\lambda > 48$ 的试件,当荷载达到最大值时,竖向位移同样急剧增加,而此时荷载略有下降。极限承载力与长细比的关系如图6(b)所示,可以发现极限承载力与长细比的关系近似呈负相关,试件延性也随着长细比增加而增加。



(a) 荷载-竖向位移曲线



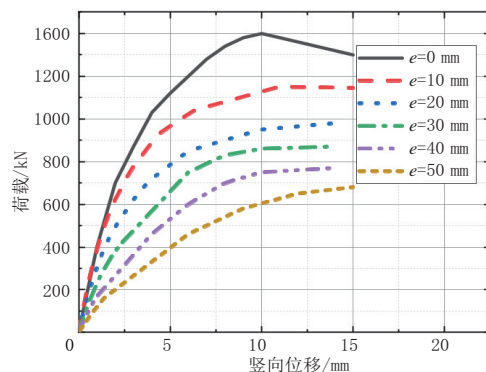
(b) 极限承载力-长细比关系曲线

图6 长细比分析

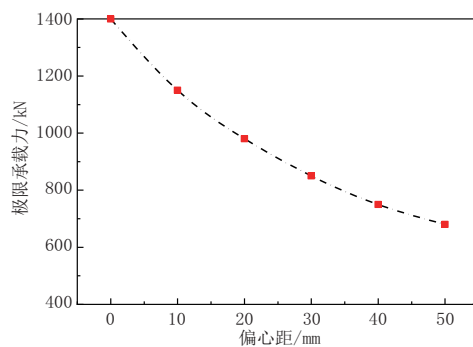
3.2.2 偏心距分析

不同偏心距的7A04-T6方形铝合金管混凝土柱在轴心受压下的荷载-竖向位移曲线和极限承载力-

偏心距的关系曲线如图7所示,图7(a)给出了不同偏心距的荷载-竖向位移关系曲线,其中构件截面的尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,壁厚为 6 mm ,核心混凝土材料为 C40,长细比为 32。结果表明:随着偏心距增大,荷载-竖向位移曲线趋于平缓;试件的延性则随着偏心距的增大而增大,而极限承载力在荷载达到峰值后几乎保持不变。同时,由图7(b)可知,极限承载力随偏心距的增大而非线性减小。



(a) 荷载-竖向位移曲线



(b) 极限承载力-偏心距关系曲线

图7 偏心距分析

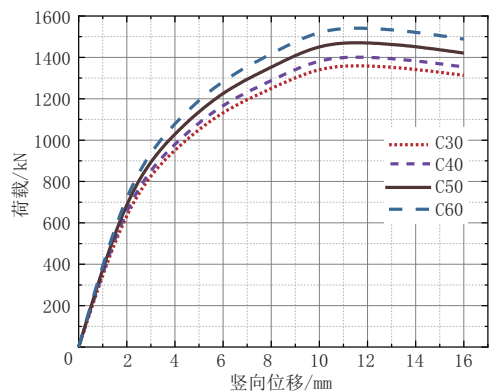
3.2.3 混凝土强度分析

7A04-T6方形铝合金管混凝土柱采用不同强度混凝土的荷载-竖向位移关系曲线和极限承载力-混凝土强度关系曲线如图8所示,其中构件截面尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,壁厚为 6 mm ,长细比为 32,偏心距为 10。可以发现,在加载初始阶段,荷载-竖向位移曲线几乎重合,表明荷载较小时,混凝土强度对荷载的影响较小。图8(b)结果表明随着混凝土强度的提高,试件的极限承载力也随之增加,与 C30 混凝土相比, C40、C50 和 C60 混凝土的极限承载力分别提高了 3%、8% 和 13%,同时,可以观察到极限承载力与混凝土强度近似呈线性关系。

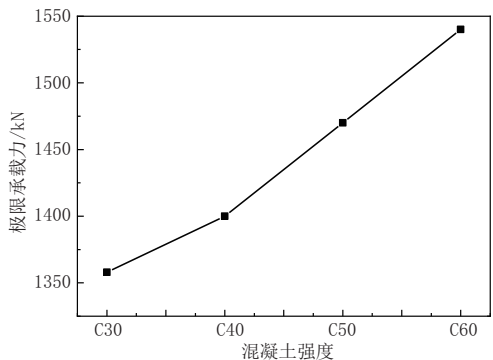
4 极限承载力研究

4.1 钢管混凝土柱承载力计算对比

由于缺乏专门针对铝合金管混凝土柱的相关



(a) 荷载-竖向位移曲线



(b) 极限承载力-混凝土强度关系曲线

图 8 混凝土强度分析

规,本文参照针对钢管混凝土柱的规范对铝合金管混凝土柱进行极限承载力研究。中国规范《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159—2004)^[18]中对矩形钢管混凝土柱的承载力计算表达式如下式(4)至式(6)所示。

$$\frac{N}{\phi N_u} + (1 - \alpha_c) \frac{\beta M_x}{(1 - 0.8 \frac{N}{N_{EX}}) M_{ux}} \leq 1 \quad (4)$$

$$\phi = 1 - 0.65 \lambda_0^2 \quad (5)$$
$$\lambda_0 \leq 0.215$$

$$\phi = \frac{1}{2 \lambda_0^2} (0.965 + 0.3 \lambda_0 + \lambda_0^2 - \sqrt{(0.965 + 0.3 \lambda_0 + \lambda_0^2)^2 - 4 \lambda_0^2}) \quad (6)$$
$$\lambda_0 > 0.215$$

式中: N 为构件极限承载力,kN; N_u 为受压承载力,kN; ϕ 为轴心受压稳定系数; α_c 为核心混凝土所承担的比例; β 为等效弯矩系数; M_x 为弯矩,kN·m; M_{ux} 为极限抗弯承载力,kN·m; N_{EX} 为欧拉临界力,kN; λ_0 为正则化长细比。

美国规范《Specification for Structural Steel Buildings》(ANSI/AISC360-10)^[19]规定:钢管混凝土柱压弯构件的承载力计算表达式如下式(7)至式(9)所示:

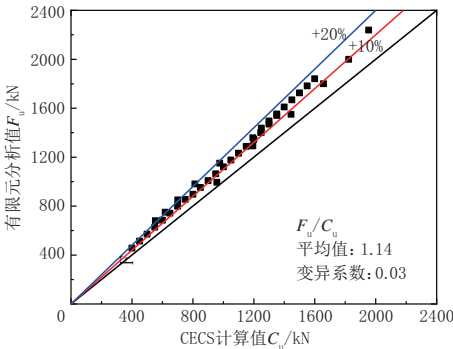
$$\begin{cases} \frac{N}{\phi_c N_u} + \frac{8}{9} \left(\frac{M}{\phi_b M_u} \right) \leq 1 & \frac{N}{\phi_c N_u} \geq 0.2 \\ \frac{N}{2 \phi_c N_u} + \left(\frac{M}{\phi_b M_u} \right) \leq 1 & \frac{N}{\phi_c N_u} \leq 0.2 \end{cases} \quad (7)$$

$$N_u = \begin{cases} A_a 0.658^{\lambda_c^2} (f_a + 0.85 f_c \frac{A_c}{A_a}) & \lambda_c \leq 1.5 \\ A_a \frac{0.877}{\lambda_c^2} (f_a + 0.85 f_c \frac{A_c}{A_a}) & \lambda_c > 1.5 \end{cases} \quad (8)$$

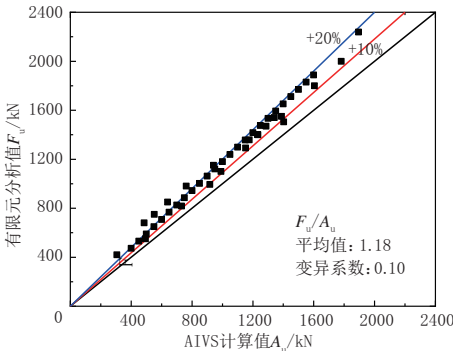
$$M_u = Z f_a \quad (9)$$

式中: N_u 为轴心受压稳定承载力,kN; M_u 为抗弯承载力,kN·m; Z 为截面模量,m³; A_a 与 A_c 分别为铝合金管截面面积和混凝土截面面积,m²; f_a 与 f_c 分别为铝合金管屈服强度和混凝土抗压强度,MPa,由于本研究未考虑抗力系数对承载力的折减作用,故系数 ϕ_c 和 ϕ_b 均取为1。

不同参数的 7A04-T6 方形铝合金管混凝土柱偏压有限元分析值与按照《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159—2004)和 *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC360-10)中所给公式分别得到的计算值对比如图 9 所示。可以看出,有限元分析值均大于规范计算值,且偏差均大于 10%,说明规范计算值偏于保守。



(a) CECS 159-2004

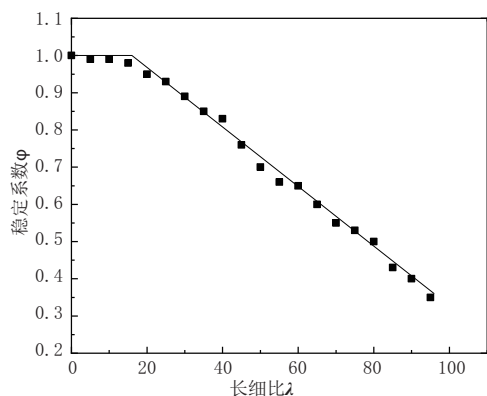


(b) AISI 360

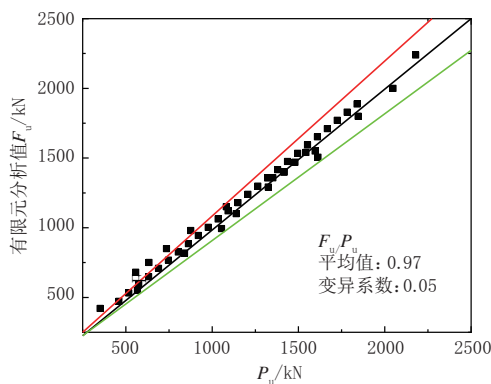
图 9 有限元分析与规范计算值对比

4.2 建议公式

图6(b)结果表明极限承载力与长细比近似呈线性关系,而通过式(5)与式(8)可发现轴心受压稳定系数 ϕ 与长细比并不遵从简单的线性关系,基于上述发现,对轴心受压稳定系数 ϕ 与长细比关系进行研究。基于有限元分析,轴心受压稳定系数与长细比的关系如图10(a)所示;通过线性回归分析,可得到轴压稳定系数 ϕ_l 与长细比 λ 的关系表达式如式(10)所示。



(a)轴心受压稳定系数与长细比关系



(b)建议公式与有限元分析对比

图10 建议公式推导

$$\phi_l = \begin{cases} 1 & \lambda < 16 \\ -0.008\lambda + 1.128 & \lambda \geq 16 \end{cases} \quad (10)$$

将通过式(10)计算所得的轴心受压稳定系数 ϕ_l 代入式(4)可得7A04-T6方形铝合金管混凝土柱的偏压极限承载力计算表达式如式(11)所示。

$$\frac{N}{\phi_l N_u} + (1 - \alpha_c) \frac{\beta M_x}{(1 - 0.8 \frac{N}{N_{EX}}) M_{ux}} \leq 1 \quad (11)$$

有限元分析结果 F_u 与通过式(11)得到计算值 P_u 的对比结果如图10(b)所示。可以看出, F_u/P_u 平均值为0.97,变异系数为0.05,表明本研究所建议的计算公式的结果与有限元分析结果基本吻合。

5 结 语

本研究利用ABAQUS软件对7A04-T6方形铝合金管混凝土柱的偏压性能开展了有限元分析,并将有限元分析结果与各文献及规程中关于钢管混凝土柱的承载力计算公式进行对比,得到以下结论:

(1)本研究所建立的有限元模型可准确模拟铝合金管混凝土柱的偏压试验,7A04-T6方形铝合金管混凝土柱在偏压荷载作用下发生失稳破坏;

(2)7A04-T6方形铝合金管混凝土柱长细比和混凝土强度与极限承载力近似呈线性关系,偏心距与极限承载力呈非线性关系,构件延性随着长细比与偏心距的增加而增加;

(3)由于缺乏铝合金管混凝土柱规范,本研究将有限元分析结果与针对钢管混凝土柱的中国规范《矩形钢管混凝土结构技术规程》(CECS 159—2004)和美国规范 *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC360-10)进行对比,结果表明有限元分析值均大于规范计算值,且偏差均大于10%,说明现有规范的计算值偏于保守;

(4)本研究最终建议的偏压承载力计算公式能够较好预测7A04-T6方形铝合金管混凝土柱的偏压承载力,然而由于矩形铝合金管混凝土柱存在高宽比问题,此公式对7A04-T6矩形铝合金管混凝土柱的偏压承载力是否适用仍需开展进一步研究检验。

参考文献:

- [1] 欧阳元文,邱丽秋,李志强.大跨度铝合金结构应用与发展综述[J].建筑结构,2018,48(14):1-7.
- [2] Lianping Y, Meng W, Shen W, et al. Rotating Performance of Temcor Joints for Aluminum Single-layer Reticulated Shells[C]//Structures, Elsevier, 2021(34):1346-1363.
- [3] 郭小农,计丽艳,李政宁,等.弯曲铝合金方管的轴压性能试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(8):1199-1208.
- [4] 曾翔,吴晚博,霍静思,等.圆铝合金管混凝土短柱轴心受压承载力研究[J].工程力学,2021,38(2):52-60.
- [5] 李翔宇,邢国华,张蓬瑶,等.7075高强铝合金管约束混凝土柱轴压承载力计算[J].工业建筑,2020,50(11):162-167.
- [6] Zhou F, Young B. Tests of Concrete-filled Aluminum Stub Columns[J]. Thin-Walled Structures, 2008,46(6):573-583.
- [7] Zhou F, Young B. Concrete-filled Aluminum Circular Hollow Section Column Tests[J]. Thin-Walled Structures, 2009,47(11):1272-1280.
- [8] 查晓雄,宫永丽.新型金属管混凝土柱力学性能研究 I:轴压短柱强度承载力的研究[J].建筑钢结构进展,2012,14(3):12-18,35.
- [9] 宫永丽,查晓雄.新型金属管混凝土柱力学性能研究 II:轴压长柱稳定系数的研究[J].建筑钢结构进展,2012,14(3):19-25,64.
- [10] 刘玉强.铝合金管(圆)混凝土轴压短柱力学性能试验研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2020.

(下转第282页)