

# 7A04-T6 铝合金矩管柱抗震性能研究

张成<sup>1</sup>,李希晨<sup>2</sup>,张若瑜<sup>2</sup>

(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)

**摘要:**为研究 7A04-T6 铝合金矩管柱的抗震性能,在验证有限元模型可行性的基础上,对 12 根 7A04-T6 铝合金矩管在低周反复荷载下的加载过程进行模拟。根据模型计算结果分析长细比、轴压比及截面形式对 7A04-T6 铝合金矩管抗震性能影响,得出随着长细比、轴压比的增大,构件抗震性能变差,与加载方向对应的矩管柱腹板尺寸对其抗震性能起着主导作用。同时提出了可用于预测 7A04-T6 铝合金矩管抗震性能的骨架曲线模型,并验证了模型的准确性。

**关键词:** 7A04-T6 铝合金;矩管柱;长细比;轴压比;截面形式;骨架曲线

**中图分类号:** U444

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2024)08-0249-06

## 0 引言

国内对管柱抗震性能的研究多集中在钢构件及钢筋混凝土组合构件方面,郭子雄等<sup>[1]</sup>对钢筋混凝土结构构件恢复力模型的研究成果进行汇总,分析了其存在的问题并提出了今后的研究建议。马衡等<sup>[2]</sup>对不同长细比的冷弯方钢管柱及四面焊接方钢管柱进行有限元分析,得出两种方钢管柱的抗震性能相近。李海锋等<sup>[3]</sup>基于箱形钢柱拟静力试验,提出了与之受力状态相关的腹板宽厚比、平面外长细比限值建议。黄晓宇<sup>[4]</sup>进行了方管混凝土柱的低周反复荷载试验,找出了轴压比、长细比及含钢率的最佳水平组合。

近年来,铝合金以其轻量、抗腐蚀、导电性、可塑性和可回收性等多重优点而脱颖而出。相对于传统材料,高强度与轻质的完美结合使其成为航空航天、汽车制造和建筑等领域的首选。此外,铝合金的卓越导热性和外观装饰性也为其广泛应用于散热设备和现代设计提供了更多可能。其中 7xxx 铝合金因其出色的性能特点,在桥梁应用中备受青睐。但国内对于铝合金管柱抗震性能的研究相对较少,郭小农等<sup>[5]</sup>完成了铝合金板式节点平面外受弯试验的拟静力试验,得出了板式节点在平面外往复弯矩作用下的详细受力过程及破坏模式。王元清等<sup>[6]</sup>对高强铝合金试件进行了单调拉伸和多种循环加载制度下的试

验,建立了循环荷载作用下高强铝合金的本构关系。贾斌等<sup>[7]</sup>采用 Osgood 模型对结构用铝合金材料的循环骨架曲线进行拟合,获得三种铝合金材料骨架曲线的关键参数。丁永君等<sup>[8]</sup>进行了 7A04-T6 铝合金空心圆管柱的低周反复荷载试验,得出轴压比、长细比对圆管柱抗震性能的影响规律。周毅<sup>[9]</sup>对 6 个 7A04-T6 铝合金圆管柱进行低周反复荷载试验,分析了圆管柱的破坏形式并给出了空心圆管柱骨架曲线的理论模型。尹书昊<sup>[10]</sup>对 7A04-T6 铝合金空心及内填混凝土圆管柱的抗震性能进行研究,提出了对应的骨架曲线及滞回恢复力模型,并给出了适用范围。

综上所述,目前国内对铝合金管柱静力性能的研究较多,而对其抗震性能的研究相对不足。因此,本文选取 7A04-T6 铝合金矩形截面管作为研究对象,采用非线性有限元分析方法研究各因素对 7A04-T6 铝合金矩管柱抗震性能的影响,旨在填补这一领域的研究空白。

## 1 有限元模拟

### 1.1 建立有限元模型

运用 ABAQUS 有限元软件进行建模分析,基于文献[10]中的 7A04-T6 铝合金圆管柱抗震试验建立有限元模型,采用实体单元,圆管截面直径为 75 mm 或 70 mm,管壁厚度 5 mm。材料本构关系以材性试验数据为基础,采用简化的双折线模型,其具体参数取值见表 1。

如图 1 所示,根据试验实际受力情况,将柱底部

收稿日期: 2023-09-27

作者简介:张成(1990—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁结构及岩土工程设计工作。

表 1 本构关系系数取值<sup>[10]</sup> 单位:MPa

材料	弹性模量 $E_s$	屈服应力 $f_{0.2}$	极限应力 $f_u$
7A04-T6 铝合金	$7.2 \times 10^4$	513.4	583.7

设为固结,顶部约束加载平面外的位移及转角。静力-通用分析步中打开几何非线性,模型采用 C3D8I 单元,考虑到该单元在厚度方向只需很少的单元,就可以得到跟二次单元相当的结果,计算成本显著降低,网格尺寸取 5。

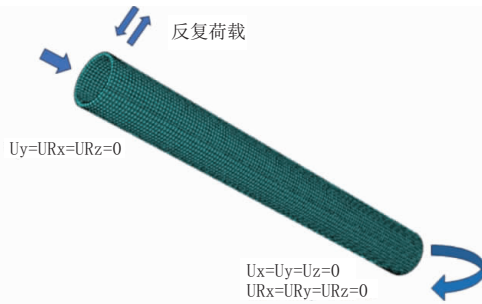


图 1 有限元模型的约束条件

### 1.2 验证有限元模型

为验证有限元模型,选取文献中提供的 3 个 7A04-T6 铝合金空心圆管柱的抗震试验数据进行对比。以其中有效长度为 600 mm 的空心圆管柱 HD0 为例,比较试验及本文所述有限元模型的破坏形式(见图 2)、骨架曲线(见图 3),加载荷载及位移特征值(见表 2),以验证模型的可靠性。

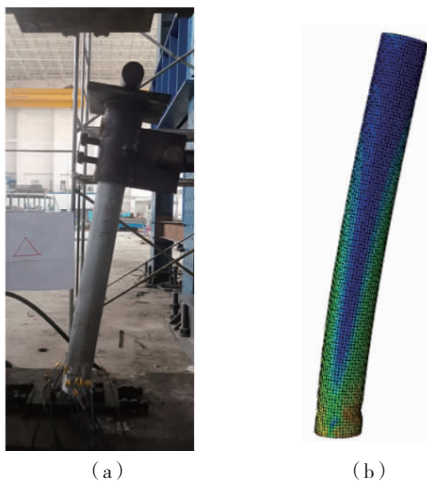


图 2 试验与有限元模型破坏形式对比

模型所得的整体破坏形式及柱脚局部破坏的位置与试验结果基本一致。

骨架曲线是每次循环加载达到水平力峰值的轨迹,反映了构件受力与变形的不同阶段及特性。对比有限元模型与试验的骨架曲线,两者弹性段斜率及各拐点位置基本一致。

对比试验及有限元结果加载荷载及位移的各项

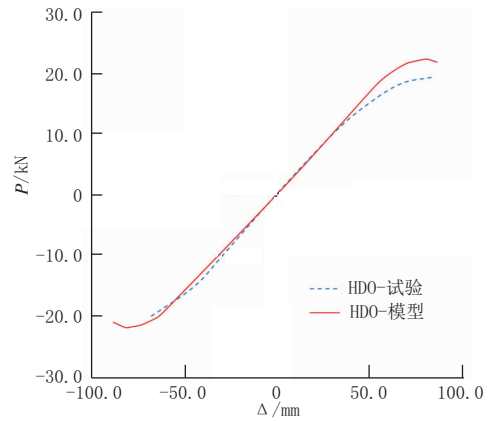


图 3 试验与有限元模型骨架曲线对比

表 2 试验与有限元模型的加载荷载及位移特征值对比

编号	屈服荷载 / kN	屈服位移 / mm	极限荷载 / kN	极限位移 / mm
HD0- 试验	19.1	67.8	20.1	85.1
HD0- 模型	20.0	63.7	21.9	81.9
比值	0.96	1.06	0.92	1.04

特征值,误差均保持在 10% 以内。

综上所述,有限元模型与现有试验结果吻合度较高,可以进行参数化分析。

## 2 参数化分析

### 2.1 参数设置

鉴于目前缺少 7A04-T6 铝合金矩管柱的抗震数据,故以图 4 所示两种典型截面建立有限元模型,同时改变试件长度、柱顶轴力及矩形截面管柱的加载方向,建立 12 个铝合金矩管的有限元模型,具体参数取值见表 3。试件编号以“R1002-W”为例,其中“R”代表矩形截面 RHS,“1000”中前两个数字“10”代表构件长度为 1 000 mm,后两个数字“02”代表构件轴压比为 0.2,“W”代表沿弱轴方向加载。

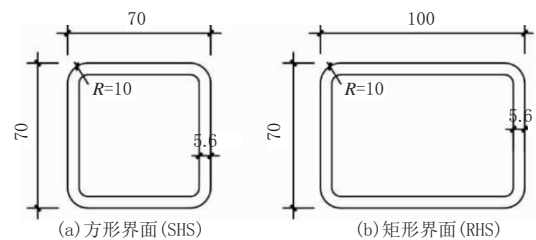


图 4 有限元模型的截面尺寸(单位:mm)

依据上述圆管柱的建模方式建立铝合金矩管柱的有限元模型,导出对应的骨架曲线,并据此求解对应的屈服荷载、屈服位移、极限荷载、极限位移及延性系数,以分析各因素对其抗震性能的影响。

表3 有限元模型参数取值

编号	轴压比	有效长度 / mm	截面尺寸 / (mm × mm)	加载方向
R1000-W	0	1 000	100 × 70	弱轴
R0402-W	0.2	400	100 × 70	弱轴
R0602-W	0.2	600	100 × 70	弱轴
R1002-W	0.2	1 000	100 × 70	弱轴
R1402-W	0.2	1 400	100 × 70	弱轴
R1602-W	0.2	1 600	100 × 70	弱轴
R1004-W	0.4	1 000	100 × 70	弱轴
R1006-W	0.6	1 000	100 × 70	弱轴
R1000-S	0.0	1 000	100 × 70	强轴
R1002-S	0.2	1 000	100 × 70	强轴
S1000	0.0	1 000	70 × 70	—
S1002	0.2	1 000	70 × 70	—

2.2 结果分析

2.2.1 长细比分析

对 12 根 7A04-T6 铝合金矩管柱中的 R0402-W, R0602-W, R1002-W, R1402-W, 1602-W 进行分析, 即长细比为 21~85 的模型。根据图 5 中所示骨架曲线, 可以看出随着长细比的增大, 骨架曲线直线段的斜率减小, 即刚度逐渐退化, 构件屈服位移及极限位移增大。根据表 4 中所列加载荷载及位移特征值, 可知长细比越大, 屈服荷载及极限荷载越小, 但变化幅度较小, 同时构件的延性随之变差。可知, 长细比对铝合金矩管柱抗震性能起着重要作用, 长细比越大, 构件抗震性能相对越差。

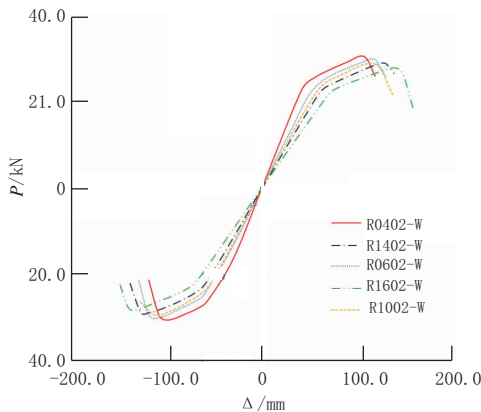


图5 不同长细比管柱的骨架曲线

2.2.2 轴压比分析

对比上述 12 根 7A04-T6 铝合金矩管柱中的 R1000-W, R1002-W, R1004-W, R1006-W, 即轴压比由 0 变动到 0.6 的模型。根据图 6 中的骨架曲线, 可以看出随着轴压比的增大, 构件弹性段刚度显著

表4 不同长细比管柱的加载荷载及位移特征值

编号	屈服荷载 / kN	屈服位移 / mm	极限荷载 / kN	极限位移 / mm	延性系数 $\mu$
R0402-W	25.4	54.7	30.3	107.0	1.96
R0602-W	25.3	67.7	30.0	115.4	1.70
R1002-W	25.6	76.8	28.8	119.5	1.56
R1402-W	25.0	83.9	28.7	127.6	1.52
R1602-W	24.1	92.4	27.6	139.0	1.50

降低, 对应的屈服位移、极限位移及极限荷载均相应减小。对图 6 中的骨架曲线进行分析, 导出表 5 中的加载荷载及位移特征值, 可知轴压比越大, 管柱各项特征值均降低, 管柱的延性越差, 因而轴压比对矩形管柱抗震性能影响较大, 轴压比与其抗震性能反相关。

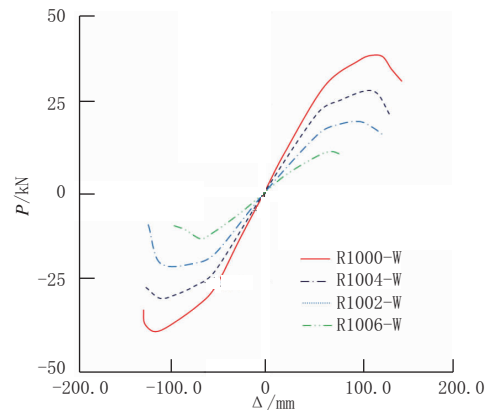


图6 不同轴压比管柱的骨架曲线

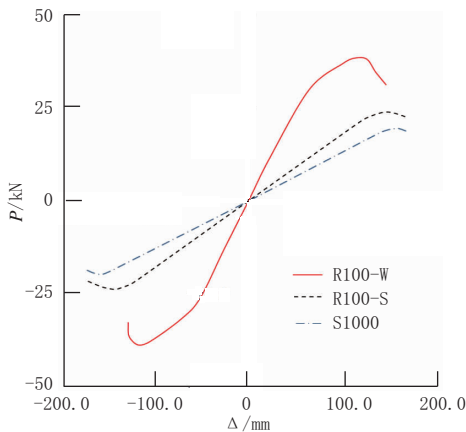
表5 不同轴压比管柱的加载荷载及位移特征值

编号	屈服荷载 / kN	屈服位移 / mm	极限荷载 / kN	极限位移 / mm	延性系数 $\mu$
R1000-W	32.6	78.5	38.7	128	1.63
R1002-W	25.6	76.8	28.8	119.5	1.56
R1004-W	18.2	68.3	20.1	101.2	1.48
R1006-W	9.8	53.6	11.6	72.4	1.35

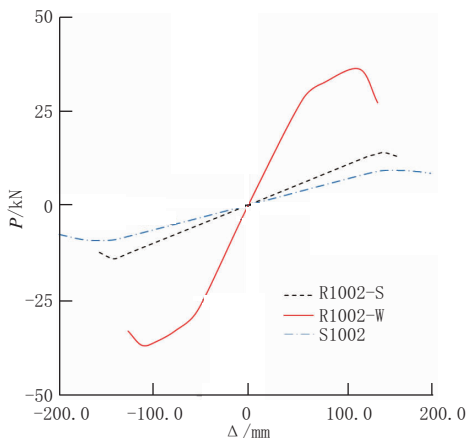
2.2.3 截面形式分析

对比上述 R1000-W, R1000-S 及 R1002-W, R1002-S 的数据, 即不同加载方向的 7A04-T6 铝合金矩管柱。根据图 7 中所示骨架曲线, 可以看出在矩形管截面尺寸相同时, 沿弱轴加载的试件刚度远高于沿强轴加载的试件。参考文献[3], 可以将矩管构件看作类似的箱形柱, 推测构件腹板作为主要抗侧力部件, 沿强轴加载时并不能使得矩形管截面的优势得到充分发挥。根据表 6 所示特征值, 可见沿弱轴加载的矩管柱延性更好, 抗震性能也远优于沿强轴加载的构件。针对这一情况, 也可以认为沿强轴加载的

矩形截面管柱长细比更大,因此其抗震性能较差,这跟上述长细比的分析结果吻合。而对比 R1000-S, S1000 及 R1002-S, S1002 的数据,即不同截面尺寸的管柱,考虑到管柱的抗侧力部件均为 70 mm × 1 000 mm 的两块矩形腹板,因此在轴压比相同时其骨架曲线及各项特征值相差较小。但 RHS 截面的管柱有更大的翼缘板面积,考虑到翼缘板刚度对抗侧的部分贡献,其弹性段刚度相比 SHS 截面的管柱较高,抗震性能也稍好一些。同时对比图 7 中(a)及(b)两种轴压比情况下的骨架曲线及表 6 中对应特征值,轴压比的变化对腹板尺寸为 100 mm × 1 000 mm 管柱的影响远小于对腹板尺寸为 70 mm × 1 000 mm 的管柱,可见截面设置不合理时,会严重浪费材料的耗能能力。



(a)无轴压



(b)轴压比 0.2

图 7 不同截面形式管柱的骨架曲线

### 3 骨架曲线理论模型

#### 3.1 理论模型

根据有限元分析所得的骨架曲线,可以大致将其分为弹性阶段、塑性的强化阶段以及柱脚塑性铰完全形成后的下降阶段。因此本文拟采用相似度最高的三折线骨架曲线模型,对 7A04-T6 铝合金矩管

表 6 不同截面形式管柱的加载荷载及位移特征值

编号	屈服荷载 / 屈服位移		极限荷载 / 极限位移		延性系数 $\mu$
	kN	mm	kN	mm	
R1000-W	32.6	78.5	38.7	128	1.63
R1002-W	25.6	76.8	28.8	119.5	1.56
R1000-S	23	135.7	23.9	149.2	1.1
R1002-S	10.5	133.8	10.9	143.6	1.07
S1000	18.9	149.1	19.5	160.9	1.08
S1002	7.23	141	7.4	149.7	1.06

柱柱顶的荷载 - 位移骨架曲线进行简化,具体如图 8 所示。

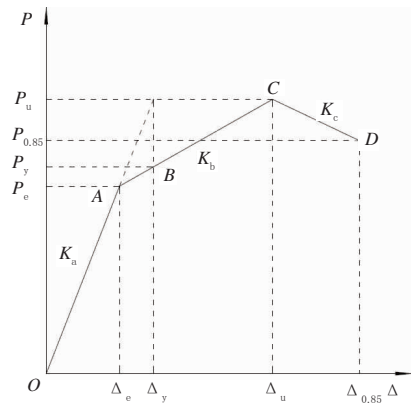


图 8 骨架曲线理论模型

#### 3.2 系数确定

该骨架曲线模型共由 3 段折线构成,其中按照本文中屈服荷载的求解方法:

$$P_u = K_a \Delta_y$$

为定义该骨架曲线,需要确定 5 个系数,分别为弹性上升阶段 OA 的斜率  $K_a$ ,下降段 CD 的斜率  $K_c$ ,弹性段最大位移  $\Delta_e$ ,屈服位移  $\Delta_y$  及最大水平推力对应的位移  $\Delta_u$ 。

通过计算确定上述 5 个系数。

(1)弹性上升阶段的斜率  $K_a$

取杆件挠曲方程为:

$$y = \Delta \sin \frac{\pi x}{2L}$$

式中: $\Delta$  为柱顶挠度; $L$  为管柱长度。

运用里兹法近似求解可得:

$$K_a = \frac{P}{\Delta} = \frac{\pi^4 EI}{32L^3} - \frac{\pi^4 N^2}{8LEA}$$

式中: $N$  为柱顶轴力; $EI$  为 7A04-T6 铝合金矩管截面的抗弯刚度; $EA$  为 7A04-T6 铝合金矩管截面的抗拉刚度。

(2)弹性段最大位移  $\Delta_e$

根据模拟结果可得柱脚为管柱的危险截面,假设危险点在柱脚底部边缘,且以其达到屈服强度时作

为弹性段的终点<sup>[11]</sup>,此时柱顶水平位移为 $\Delta_e$ ,可得:

$$\frac{M_x}{W} = f_y$$

整理可得:

$$\Delta_e = \frac{W f_y}{N + K_a L}$$

(3) 屈服位移 $\Delta_y$

采用文献[10]中的假设,认为 $\Delta_y$ 与 $\Delta_e$ 之间存在某种线性关系,将本文模型结果列于表7,综合考虑取 $\Delta_y$ 。

表7  $\Delta_y$ 与 $\Delta_e$ 的关系

编号	$\Delta_e$	$\Delta_y$	$\Delta_y / \Delta_e$
R1000-W	65.9	78.5	1.19
R0402-W	41.8	54.7	1.31
R0602-W	57.9	67.7	1.17
R1002-W	57.7	76.8	1.33
R1402-W	68.5	83.9	1.22
R1602-W	68.9	89.5	1.30
R1004-W	58.5	68.3	1.17
R1006-W	40.0	53.6	1.34
R1000-S	118.7	135.7	1.14
R1002-S	114.3	133.8	1.17
S1000	132.2	149.1	1.13
S1002	120.0	141.0	1.18
均值			1.22

可得: $\Delta_y = 1.25\Delta_e$ 。

(4) 最大水平推力对应的位移 $\Delta_u$

根据有限元分析结果可以看出,矩形管柱的延性系数跟其骨架曲线弹性段的斜率存在一定关联,弹性段斜率越高,其延性系数也相应越大。故本文假设 $\mu^2$ 与 $K_a$ 存在线性关系,根据上述模拟结果进行数据拟合,同时为使得量纲统一,引入7A04-T6铝合金的弹性模量 $E_s$ 作为常量,可以得到:

$$\Delta_u = 25 \sqrt{\frac{K_a}{E_s}} \Delta_y$$

(5) 下降段斜率 $K_c$

矩形管柱水平承载力达到峰值后,在其柱脚附近形成塑性铰。假设塑性铰在柱脚底部边缘,此时将管柱视作二力杆,如图9所示,塑性铰可以抵抗 $N$ 沿管柱法线方向的分力 $N_n$ ,同时假定塑性铰残余的抵抗力矩 $FL$ 保持恒定,运用理论力学可以求得:

$$\frac{dP}{d\theta} = -N \cos(2\theta) + F \sin \theta$$

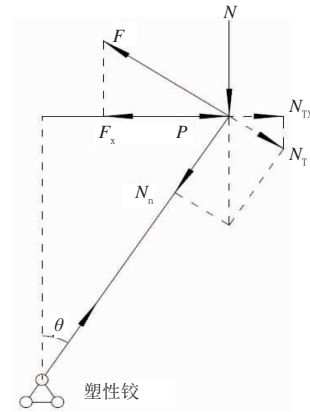


图9 管柱受力示意图

根据所取的杆件挠曲方程可知,当柱脚转角为 $\theta$ 时,跨中挠度 $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{2L\theta}{\pi}$$

合并上述两式,同时由于该下降段长度较短,近似将 $\Delta$ 取为试件达到极限荷载 $P_u$ 时的位移 $\Delta_u$ ,最后舍去公式中的小量,得到 $K_c$ :

$$K_c = \frac{dP}{d\Delta} = -\frac{\pi N}{2L}$$

3.3 模型验证

运用ABAQUS建立两个模型,其具体参数取值见表8,将所得分析结果与上述计算所得骨架曲线进行对比,将对应的骨架曲线如图10所示。

表8 新建模型的参数

编号	轴压比	有效长度/m	截面尺寸/(mm × mm)	加载方向
R0801-W	0	800	100 × 70	弱轴
R1203-W	0.3	1 200	100 × 70	弱轴

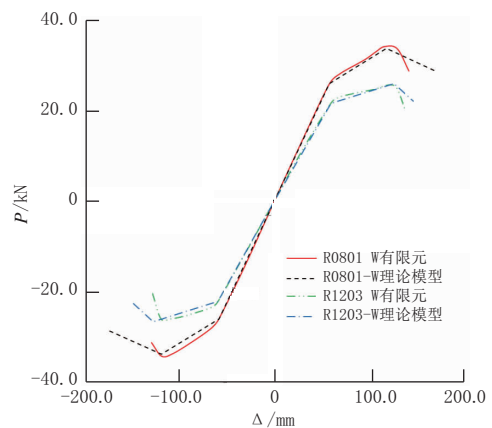


图10 有限元模拟结果跟理论模型对比

由于求解 $K_c$ 时假设达到极限强度后塑性铰的抵抗力矩保持恒定,且塑性铰位置在柱脚底部边缘,这与实际情况存在差异,导致下降段的斜率与模拟结果存在些许出入。除下降段外两者误差均控制在6%以

内,整体上有限元模拟结果与本文所提的骨架曲线模型吻合度较高。

#### 4 结 论

(1)利用 ABAQUS 软件,验证了模型的可行性,并以此为参考建立了 12 个 7A04-T6 铝合金矩管柱在低周反复荷载作用下的模型。

(2)长细比对 7A04-T6 铝合金矩管柱抗震性能影响较大,随着长细比的增大,管柱水平承载力降低,相应的位移特征值增大,但整体延性降低,抗震性能变差。

(3)轴压比是影响 7A04-T6 铝合金矩管柱水平承载力及延性的重要因素,轴压比越大的管柱水平承载力及相应的位移特征值越小,延性越低,抗震性能随之越差。

(4)沿矩形截面弱轴加载的管柱,其抗震性能远高于沿强轴加载的管柱,类比箱形截面,7A04-T6 铝合金矩管的抗震性能主要由其腹板的尺寸控制,翼缘板对其抗震性能作用较小。

(5)提出了针对 7A04-T6 铝合金矩管在低周反复荷载作用下的骨架曲线,经验证该曲线可以较好

地拟合有限元软件的分析结果,可以为 7A04-T6 铝合金矩管抗震性能的分析提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 郭子雄,杨勇.恢复力模型研究现状及存在问题[J].世界地震工程,2004,20(4):47-51.
- [2] 马衡,乔亚玲.长细比不同的冷弯矩形钢管柱和四面焊接矩形钢管柱抗震性能的比较[J].工业建筑,2012(增刊1):335-339.
- [3] 李海锋,罗永峰,李德章,等.箱形钢柱受力性能分析及抗震设计建议[J].建筑结构学报,2013,34(1):93-100.
- [4] 黄晓宇.方钢管混凝土柱抗震性能试验研究[D].天津:天津大学,2004.
- [5] 郭小农,陈宇,刘林林,等.铝合金板式节点平面外受弯滞回性能试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(8):90-99.
- [6] 王元清,王中兴,胡晓光,等.循环荷载作用下高强铝合金本构关系试验研究[J].土木工程学报,2016,49(增刊2):1-7.
- [7] 贾斌,张其林,罗晓群.结构用铝合金材料循环加载性能研究[J].土木工程学报,2018,51(8):21-27,36.
- [8] 丁永君,周毅,李进军,等.7A04-T6 铝合金圆管柱抗震性能研究[J].建筑技术,2022,53(2):246-249.
- [9] 周毅.7A04-T6 铝合金圆管柱抗震性能研究[D].天津:天津大学,2020.
- [10] 尹书昊.7A04 铝合金圆管柱及圆管混凝土柱抗震性能研究 [D].天津:天津大学,2020.
- [11] 张继良,常柱,闫和清,等.弯矩增大系数  $\eta$  在偏心受压构件中的正确应用[J].黑龙江水利科技,2001,29(2):32-33.

## 《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)