

文章编号:1673-2049(2019)05-0080-09

# 圆锥形中空夹层钢管混凝土压弯构件抗震性能

史艳莉,张 宸,王景玄,王文达

(兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**选取合理的材料本构模型和混凝土损伤指标,通过 ABAQUS 软件建立圆锥形中空夹层钢管混凝土构件数值模型,并采用现有试验数据进行模型验证。在此基础上建立典型算例,分析典型算例的抗震性能指标,同时描述构件的破坏模态。对轴压比、空心率和长细比这 3 个对圆锥形中空夹层钢管混凝土抗震性能指标影响较为显著的参数进行分析,探究 3 个参数对滞回曲线极限承载力、延性系数和耗能能力的影响规律。比较圆锥形中空夹层钢管混凝土与不同截面尺寸的等截面圆中空夹层钢管混凝土抗震性能的差别,探究圆锥形中空夹层钢管混凝土与何种截面尺寸的圆中空夹层钢管混凝土可以实现抗震性能上的等效。结果表明:在一定范围内,轴压比和长细比的增大使得构件的耗能性能变差,空心率的增大使得构件的耗能性能变好,但需明确各参数的限值;截面面积减小使得构件的承载力降低、耗能性能变差;圆锥形中空夹层钢管混凝土的抗震性能与距其底部 1/4 高度处截面大小的圆中空夹层钢管混凝土等效。

**关键词:**圆锥形中空夹层钢管混凝土;数值分析;抗震性能;压弯构件

**中图分类号:**TU398

**文献标志码:**A

## Seismic Behavior of Tapered Concrete-filled Double Skin Steel Tube Compression-bending Members

SHI Yan-li, ZHANG Chen, WANG Jing-xuan, WANG Wen-da

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** The rational material constitutive model and concrete damage index were chosen, and the numerical analysis model of tapered concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) specimens were established by the ABAQUS software. The results were compared with the existing experimental data to verify the rationality of the model. On the basis, a typical example was established, and the seismic performance index of the typical example was analyzed. At the same time, the failure mode of the component was described. The parameters that had significant influence on the seismic performance index of the tapered CFDST were analyzed, such as axial compression ratio, hollow ratio and slenderness ratio. The influences of three parameters on the ultimate bearing capacity, ductility coefficient and energy dissipation capacity of hysteretic curve were investigated. The seismic behaviors between tapered CFDST and uniform section CFDST with different section sizes were compared. The equivalent seismic performances of tapered CFDST and uniform section CFDST with different section sizes were explored. The results show that within a certain range, the increases of axial compression ratio and slenderness ratio make the energy dissipation performance of components worse, and the increase of hollow ratio makes

收稿日期:2018-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51768038);甘肃省高校协同创新团队项目(2018C-08)

作者简介:史艳莉(1977-),女,河北涿州人,副教授,工学博士,E-mail:ceshiyl@163.com。

the energy dissipation performance of components better, but it is necessary to define the limits of each parameter. The reduction of section area reduces the bearing capacity and energy dissipation performance of members. The seismic behaviors of the tapered CFDST are equivalent to the uniform section of CFDST at one quarter of the height from the bottom of the tapered CFDST.

**Key words:** tapered concrete-filled double skin steel tube; numerical analysis; seismic behavior; compression-bending member

## 0 引 言

圆中空夹层钢管混凝土是在传统实心圆钢管混凝土的基础上发展起来的一种新型钢管混凝土结构形式,其截面开展,抗弯刚度大,自重轻,抗震性能好<sup>[1]</sup>。根据力学性能特点,常将其运用于风力发电塔架、航站楼支撑柱、高桥墩等长细比较大、轴向荷载较小、具有耐撞性、侧向抗弯要求较高的工程当中,具有较好的应用前景<sup>[2-4]</sup>。以风力发电塔架为例,此类构筑物的竖向支撑构件所受轴向压力往往较小,其更重要的任务是承担上部水平荷载产生的弯矩,故在实际工程中,此类构件多设计为受力形式更合理的变截面构件。将变截面的概念引入圆中空夹层钢管混凝土中,发展成为圆锥形中空夹层钢管混凝土。因此,有必要对低周往复荷载下圆锥形中空夹层钢管混凝土的抗震性能进行研究,为相关工程设计提供参考。

关于等截面中空夹层钢管混凝土试验研究和理论分析已有较多报道。Huang 等<sup>[5]</sup>对中空夹层钢管混凝土轴压构件进行有限元分析,分析了材料强度、空心率、含钢率等因素对构件承载力、纵向应变、接触应力的影响。陶忠等<sup>[6]</sup>对 14 个轴心受压和 12 个偏心受压的圆中空夹层钢管混凝土进行试验研究,试验考虑径厚比、空心率、长细比和偏心率的影响,描述了构件在轴压和偏压下的破坏模态,进行了受力全过程分析。赵均海等<sup>[7]</sup>利用统一强度理论,对圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱进行承载力分析,提出了承载力计算公式。田宏伟等<sup>[8]</sup>基于双剪统一强度理论,考虑径向压力对环向拉力和纵向压力的影响,提出圆钢管混凝土长柱的承载力计算公式。Han 等<sup>[1]</sup>对圆中空夹层钢管混凝土构件进行了滞回试验,结果表明,轴压比对构件性能影响较大,导致刚度退化延缓、位移延性降低、总耗能减小。卢方伟等<sup>[9]</sup>利用连续介质力学理论分析了中空夹层钢管混凝土轴压受力全过程,给出了组合弹性模量理论计算公式。董崇海<sup>[10]</sup>针对风力发电塔架的使用要求设计了 5 个带肋的圆中空夹层钢管混凝土塔

架,研究其受力机理和破坏形式。对于圆锥形钢管混凝土的力学性能,国内外学者也进行了研究。Li 等<sup>[11-12]</sup>对圆锥形中空夹层钢管混凝土短柱进行了轴压和偏压试验,发现轴压短柱的破坏形态为顶部发生灯笼状鼓曲,偏压长柱的破坏形态为距柱底 3/4 高度处发生挠曲。任庆新等<sup>[13]</sup>采用 ABAQUS 对圆锥形钢管混凝土长柱的受力全过程和破坏模态进行分析,结果表明,在距柱底 3/4 高度处发生挠曲。

本文采用 ABAQUS 对圆锥形中空夹层钢管混凝土压弯构件抗震性能进行理论研究,在模型验证的基础上建立典型算例,对不同轴压比、空心率和长细比的构件进行抗震性能分析,并对比不同截面尺寸的圆中空夹层钢管混凝土与圆锥形中空夹层钢管混凝土的抗震性能指标,所得结果可为该类构件的设计和工程应用提供参考。

## 1 有限元模型

### 1.1 模型建立

采用 ABAQUS 对往复荷载作用下的圆锥形中空夹层钢管混凝土进行数值模拟。钢材采用双折线随动强化模型,钢材屈服前按照弹性刚度加卸载,达到屈服荷载后钢材进入强化阶段,强化阶段模量取  $0.01E_s$  ( $E_s$  为钢材的初始弹性模量)。受压和受拉状态下的混凝土本构模型分别参考文献[14],[15];对于往复荷载作用下的混凝土本构模型,定义混凝土拉(压)损伤因子  $d_t$  ( $d_c$ )、受拉刚度恢复系数  $\omega_t = 0$  和受压刚度恢复系数  $\omega_c = 1$ 。损伤因子  $d_t$  ( $d_c$ ) 的表达式<sup>[16]</sup>为

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t + n_t \sigma_{t0}}{E_c (n_t \sigma_{t0} / E_c + \epsilon_t)} \quad (1)$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c + n_c \sigma_{c0}}{E_c (n_c \sigma_{c0} / E_c + \epsilon_c)} \quad (2)$$

式中:  $E_c$  为混凝土初始弹性模量;  $\sigma_t$ ,  $\sigma_c$  分别为混凝土拉应力和压应力;  $n_t$ ,  $n_c$  分别为混凝土拉、压损伤指标系数,对于夹层混凝土,  $n_t = 1$ ,  $n_c = 2$ ;  $\sigma_{t0}$ ,  $\sigma_{c0}$  分别为混凝土初始拉应力和压应力;  $\epsilon_t$ ,  $\epsilon_c$  分别为混凝土拉应变和压应变。

由于圆锥形中空夹层钢管混凝土多以悬臂柱的形式运用于实际工程,故将有限元模型设定为底部固定端、顶部自由端的悬臂柱。内外钢管与夹层混凝土之间的相互作用通过定义切向和法向的接触来实现,切向采用库仑摩擦模型,摩擦因数取 0.25;法向参考文献[17],采用接触单元模拟,接触单元刚度为  $1\,000\text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$ 。模型计算时设置 2 个分析步,初始状态下构件底部为固定端,顶部为自由端,step-1 时在构件顶部施加恒定轴力,step-2 时使用位移加载方式在构件顶部施加水平往复荷载。有限元模型的网格划分及边界条件如图 1 所示。加载制度根据文献[18]确定,取  $0.25\Delta_y, 0.5\Delta_y, 0.75\Delta_y, \Delta_y, 1.5\Delta_y, 2\Delta_y, 3\Delta_y, 5\Delta_y, 7\Delta_y, 8\Delta_y, 9\Delta_y$  依次加载,其中  $\Delta_y$  为单调加载荷载-位移曲线的屈服位移。

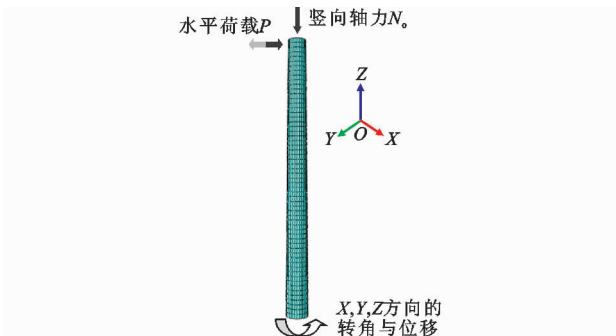


图 1 网格划分及边界条件

Fig. 1 Mesh Generation and Boundary Condition

1.2 模型验证

文献[1]对圆中空夹层钢管混凝土压弯构件抗震性能进行试验研究,试件两端采用铰接,在试件顶部施加恒定轴力,在试件跨中施加水平往复荷载。文献[1]定义空心率  $\chi = d/(D - 2t_{so})$ ,其中  $d$  为内钢管直径,  $D$  为外钢管直径,  $t_{so}$  为外钢管壁厚,轴压比  $n = N_o/N_u$ ,  $N_u$  为构件的轴压极限荷载。文献[12]对圆锥形中空夹层钢管混凝土偏压长柱进行了试验研究,试件两端铰接,作用偏心荷载,空心率  $\chi$  含义同文献[1],定义锥度  $\theta$  为锥形外钢管母线和垂

线的夹角,如图 2 所示。试件主要参数如表 1 所示,荷载-位移( $P-\Delta$ )曲线试验结果与有限元模拟结果的对比如图 3 所示。

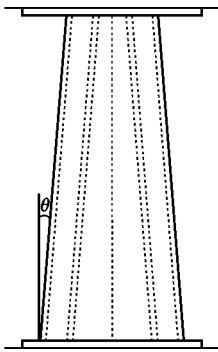


图 2 锥度示意图

Fig. 2 Diagram of Tapered Angle

由图 3 可见:圆中空夹层钢管混凝土滞回曲线模拟结果的加、卸载刚度和承载力与试验曲线吻合良好;圆锥形中空夹层钢管混凝土模拟结果的初始刚度、承载力和延性与试验结果总体上吻合良好。本文的建模方法可用于圆锥形中空夹层钢管混凝土压弯构件抗震性能数值计算。

1.3 典型算例

典型算例的构件尺寸依据《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)[19]中规定的参数范围确定,典型构件的基本参数为:外钢管底径  $D_b = 600\text{ mm}$ ,外钢管顶径  $D_t = 480\text{ mm}$ ,外钢管壁厚  $t_o = 10\text{ mm}$ ,内钢管底径  $d_b = 348\text{ mm}$ ,内钢管顶径  $d_t = 278.4\text{ mm}$ ,内钢管壁厚  $t_i = 10\text{ mm}$ ,柱长  $L = 6\,000\text{ mm}$ ,长细比  $\lambda = 40$ ,锥度  $\theta = 0.57^\circ$ ,空心率  $\chi = 0.6$ ,轴压比  $n = 0.1$ ,混凝土强度  $f_{cu} = 60\text{ MPa}$ ,外钢管强度  $f_{yo} = 345\text{ MPa}$ ,内钢管强度  $f_{yi} = 345\text{ MPa}$ 。参考文献[1],[12],[13],本文对 2 个参数的计算方法进行整合,其中,空心率  $\chi = d_b/(D_b - 2t_o)$ ,长细比  $\lambda = 4L/D_b$ 。典型算例的荷载-位移曲线如图 4 所示。

1.4 破坏模式

图 5 为典型构件的破坏模式。构件的主要破坏

表 1 试件主要参数

Tab. 1 Main Parameters of Specimens

试件编号	$L/\text{mm}$	$D_b/\text{mm}$	$D_t/\text{mm}$	$t_o/\text{mm}$	$d_b/\text{mm}$	$d_t/\text{mm}$	$t_i/\text{mm}$	$f_{yo}/\text{MPa}$	$f_{yi}/\text{MPa}$	$f_{cu}/\text{MPa}$	$\chi$	$n$	$\theta/(\text{^\circ})$	$e/\text{mm}$	数据来源
cc2-1	1 500	114	114	3.00	32	32	3.00	308.0	422.3	38.9	0.30	0.00			文献[1]
cc2-2	1 500	114	114	3.00	32	32	3.00	308.0	422.3	38.9	0.30	0.21			
cc2-3	1 500	114	114	3.00	32	32	3.00	308.0	422.3	38.9	0.30	0.43			
SC3-1	3 500	350	280	3.82	231	161	2.92	439.3	396.5	64.0	0.67		0.57	35	文献[12]
SC4-1	3 500	350	280	3.82	231	161	2.92	439.3	396.5	64.0	0.67		0.57	175	
SC5-1	1 750	350	280	3.82	231	196	2.92	439.3	396.5	64.0	0.67		0.57	105	

注:  $L$  为试件长度;  $e$  为偏心距。

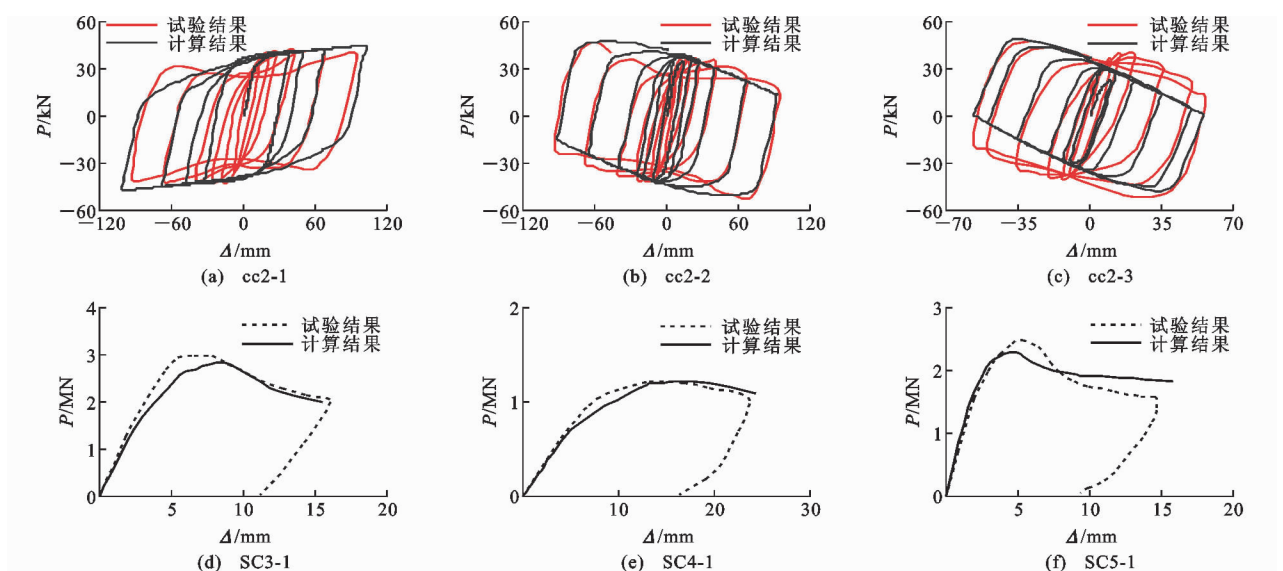


图 3 构件的荷载-位移滞回曲线有限元计算结果与试验结果对比

Fig. 3 Comparisons of Load-displacement Relationship Curves Between Finite Element Analysis Results and Test Results of Specimens

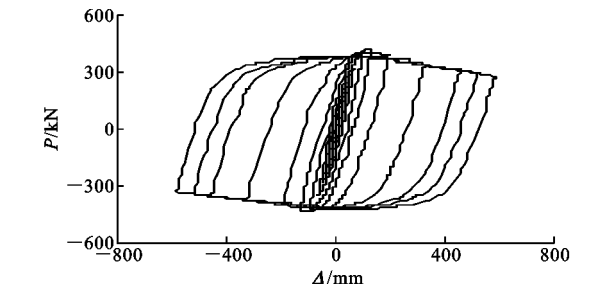


图 4 典型算例的  $P-\Delta$  曲线  
Fig. 4  $P-\Delta$  Curve of Typical Example

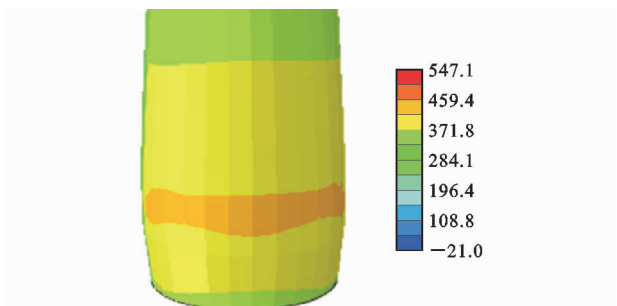


图 6 外钢管失效处的应力云图(单位:MPa)  
Fig. 6 Stress Contour of Outer Steel Tube at Failure Place (Unit:MPa)

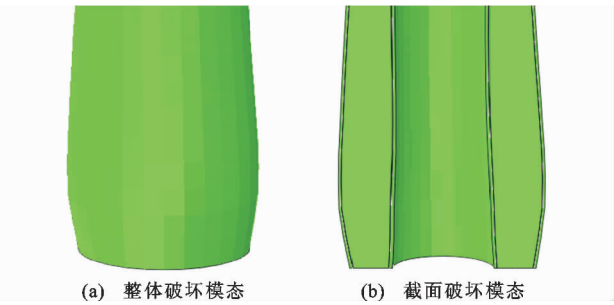


图 5 典型构件的破坏模式  
Fig. 5 Failure Modes of Typical Specimens

模态体现为底部的灯笼状鼓曲和外钢管底部的横向开裂。由图 5 可知,外钢管向外侧严重鼓曲,内钢管向内侧轻微鼓曲,整体呈现出灯笼状。图 6 为构件发生较大侧移时底部鼓曲处的应力云图,此处的拉应力超过外钢管钢材的抗拉强度极限,外钢管断裂。

2 抗震性能指标分析

通常用刚度退化、延性指标和耗能指标来描述结构构件的抗震性能,其中延性指标由位移延性系

数  $\mu$  来表示,耗能指标由黏滞阻尼系数  $h_e$  表示。

2.1 强度指标

通常用屈服荷载  $P_y$ 、峰值荷载  $P_{max}$  和极限荷载  $P_u$  以及三者在  $P-\Delta$  滞回骨架曲线中对应的屈服位移  $\Delta_y$ 、峰值位移  $\Delta_{max}$  和极限位移  $\Delta_u$  来表示构件的强度指标。屈服位移  $\Delta_y$  通过能量等值法<sup>[12]</sup> 进行取值,如图 7 所示,曲线面积表示构件耗能,过骨架曲线的峰值点 A 作水平线 AB,过 B 点作垂线与骨架曲线交于 C 点,使得三角形面积  $S_{\triangle OAB}$  与扇形面积  $S_{OAC}$  相等,此时 C 点为骨架曲线的屈服点,C 点对应的位移为屈服位移  $\Delta_y$ ;根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)<sup>[18]</sup> 确定极限位移  $\Delta_u$  为承载力下降至峰值承载力  $P_{max}$  的 85% 时对应的位移。构件的强度指标如表 2 所示。

2.2 刚度退化指标

往复荷载作用下水平承载力的退化主要由构件刚度的退化引起,因此有必要研究构件的刚度退化

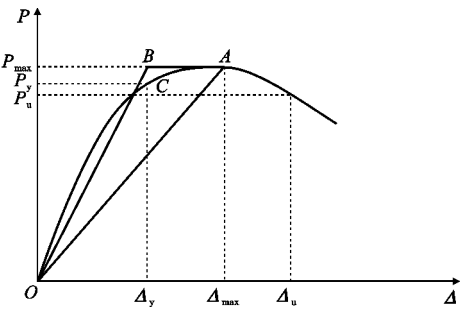


图 7  $\Delta_y$  和  $\Delta_u$  的取值

Fig. 7 Values of  $\Delta_y$  and  $\Delta_u$

表 2 构件的强度指标

Tab. 2 Strength Indexes of Specimens

强度指标	$P_y/\text{kN}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$P_{\max}/\text{kN}$	$\Delta_{\max}/\text{mm}$	$P_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$
计算结果	353.7	69.75	421.4	118.5	353.8	311.13

规律。本文采用割线刚度  $K_j$  来表示构件的刚度退化<sup>[20]</sup>,表达式为

$$K_j = \frac{|-P_j| + |+P_j|}{|-\Delta_j| + |+\Delta_j|} \quad (3)$$

式中:  $|-P_j|$ ,  $|+P_j|$  分别为第  $j$  级加载时最大拉、压荷载;  $|\Delta_j|$ ,  $|+\Delta_j|$  分别为第  $j$  级加载时最大拉、压荷载对应的位移。

一般认为,达到极限位移  $\Delta_u$  时构件发生破坏,虽然定义加载制度时,最大施加位移为  $9\Delta_y$  (627.75 mm) 超过极限位移  $\Delta_u$  (311.13 mm),但本文只分析构件达到极限位移 ( $5\Delta_y = 348.75$  mm) 前的抗震性能指标。

提取每级滞回环的  $|-P_j|$ ,  $|+P_j|$ ,  $|\Delta_j|$ ,  $|+\Delta_j|$ , 绘制割线刚度  $K_j$  变化曲线,如图 8 所示。由图 8 可知:构件的割线刚度  $K_j$  呈减小趋势。构件达到屈服位移前,刚度退化明显,达到屈服后的两级刚度退化较小,但随着位移的增加,构件在达到极限位移后,刚度退化又逐渐明显。

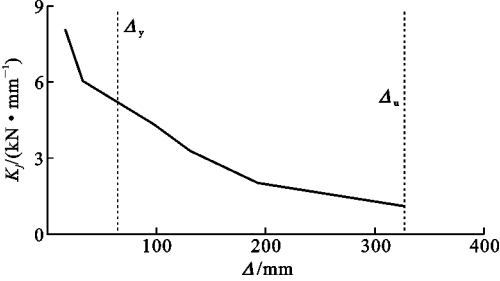


图 8 刚度退化曲线

Fig. 8 Stiffness Degradation Curve

2.3 延性系数

延性是指结构构件在达到峰值承载力后,破坏前其承载力无显著降低的条件下经受非弹性变形的

能力。位移延性系数  $\mu$  是指构件极限位移与屈服位移的比值,表达式为  $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ 。

经计算,滞回环的屈服位移  $\Delta_y = 69.75$  mm,极限位移  $\Delta_u = 311.13$  mm,位移延性系数  $\mu = 4.46$ 。文献[14]指出钢管混凝土柱的位移延性系数  $\mu$  应大于 3,由此可以说明典型算例的延性系数较好。

2.4 耗能能力

构件的耗能能力是评判构件抗震性能优劣的重要指标,滞回环越饱满(面积越大),构件在往复荷载中消耗的能量越多,通常用黏滞阻尼系数  $h_e$  来表示构件的耗能能力,表达式为  $h_e = E' / (2\pi)$ ,其中  $E'$  为能量耗散系数,  $E' = S_{ABCD} / (S_{\triangle OBE} + S_{\triangle ODF})$ ,如图 9 所示,其中  $S_{ABCD}$  为滞回环 ABCDA 围成的面积,  $S_{\triangle OBE}$ ,  $S_{\triangle ODF}$  分别为  $\triangle OBE$ ,  $\triangle ODF$  的面积。

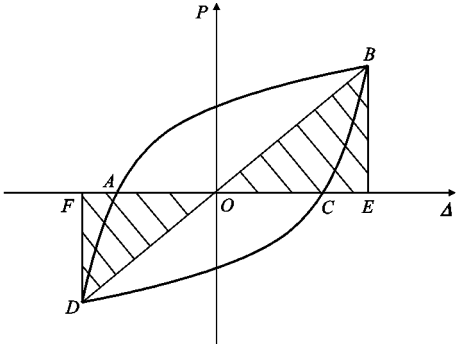


图 9 能量耗散系数示意图

Fig. 9 Diagram of Energy Dissipation Coefficient

构件滞回环在达到屈服位移后每级的能量耗散系数分别为:  $E_{\Delta_y} = 0.83$ ,  $E_{1.5\Delta_y} = 1.11$ ,  $E_{2\Delta_y} = 1.52$ ,  $E_{3\Delta_y} = 3.41$ ,  $E_{5\Delta_y} = 6.03$ ,达到极限位移时的黏滞阻尼系数  $h_e = 0.96$ 。文献[16]指出一般钢筋混凝土结构的黏滞阻尼系数  $h_e$  约为 0.1,型钢混凝土结构的  $h_e$  约为 0.3,可见典型算例的黏滞阻尼系数优于一般钢筋混凝土和型钢混凝土。

圆锥形中空夹层钢管混凝土的强度指标、刚度退化指标、延性系数及耗能能力较好,抗震性能指标总体优于钢筋混凝土、型钢混凝土和普通钢管混凝土。

3 主要参数对构件抗震性能指标的影响

对圆锥形中空夹层钢管混凝土抗震性能影响较大的主要参数(轴压比、空心率、长细比)进行抗震性能对比。在典型算例的基础上每组改变 1 个参数,共计 9 个算例模型。第 1 组对比轴压比,考虑到圆锥形中空夹层钢管混凝土受较小轴力的特点,轴压

比取值范围设为 0~0.3;第 2 组对比空心率,在外钢管尺寸不变的前提下减小构件的空心率,可以有效减小构件自重,空心率取值范围设为 0.5~0.8,以比较大空心率构件的抗震性能是否满足使用要

求;第 3 组对比长细比,圆锥形中空夹层钢管混凝土多用于大长细比构件中,需探究长细比对构件抗震性能的影响规律,长细比取值范围设为 20~80。具体参数如表 3 所示。

表 3 算例模型构件的主要参数

Tab. 3 Main Parameters of Specimens of Example Model

构件编号	$L/\text{mm}$	$D_b/\text{mm}$	$D_i/\text{mm}$	$t_o/\text{mm}$	$d_b/\text{mm}$	$d_i/\text{mm}$	$t_i/\text{mm}$	$f_{yo}/\text{MPa}$	$f_{yi}/\text{MPa}$	$f_{cu}/\text{MPa}$	$\chi$	$n$	$\theta/(\text{^\circ})$	$\lambda$	对比参数
1	6 000	600	480	10	348	228.4	10	345	345	60	0.6	0.0	0.57	40	轴压比
2	6 000	600	480	10	348	228.4	10	345	345	60	0.6	0.2	0.57	40	
3	6 000	600	480	10	348	228.4	10	345	345	60	0.6	0.3	0.57	40	
4	6 000	600	480	10	290	170.0	10	345	345	60	0.5	0.1	0.57	40	空心率
5	6 000	600	480	10	406	286.0	10	345	345	60	0.7	0.1	0.57	40	
6	6 000	600	480	10	464	344.0	10	345	345	60	0.8	0.1	0.57	40	
7	3 000	600	540	10	362	288.0	10	345	345	60	0.6	0.1	0.57	20	长细比
8	9 000	600	420	10	362	168.0	10	345	345	60	0.6	0.1	0.57	60	
9	12 000	600	362	10	362	110.0	10	345	345	60	0.6	0.1	0.57	80	

3.1 滞回曲线

图 10 为表 3 构件的  $P-\Delta$  滞回曲线和骨架曲线对比图。由图 10 可见:滞回曲线形状较为饱满,形状呈楔形,无明显捏缩,说明构件有良好的变形能力和耗能能力;轴压比对构件初始刚度的影响较小,但对极限承载力和延性有显著影响,随着轴压比的增大,构件骨架曲线的极限承载力降低,延性变差;空心率对构件极限承载力影响较小但对延性影响明显,空心率较大时,混凝土面积较小,构件自重也随之减轻,构件的极限承载力提高,延性变好,在外钢管尺寸保持不变的前提下,将构件设置为大空心率,不仅可以有效地改善构件力学性能,还可以节约材料,节省成本;长细比对构件极限承载力和延性的影响程度最大,随着长细比的增大,构件的极限承载力显著降低,延性明显变差,骨架曲线形状显著改变。

3.2 延性指标与耗能能力

表 4 为构件的延性指标和耗能能力,并给出了构件的极限位移  $\Delta_u$ 、屈服位移  $\Delta_y$  和屈服位移后极限位移前每级加载的能量耗散系数。当轴压比  $n$  为 0,0.1,0.2,0.3 时,水平峰值承载力分别为 435.7,421.4,371.4,328.6 kN,分别降低了 3.2%,14.8%,24.6%;位移延性系数  $\mu$  分别降低了 35.8%,62.2%,59.8%;黏滞阻尼系数  $h_e$  分别降低了 30.4%,48.6%,70.3%。构件在水平荷载作用下发生侧移,此时顶部轴力的增大导致附加弯矩增大,从而使构件的延性指标降低。

当空心率  $\chi$  为 0.6,0.7,0.8 时,水平峰值承载力分别为 421.4,427.3,444.6 kN,分别比  $\chi$  为 0.5 时的水平峰值承载力 405.8 kN 提升了 3.8%,

5.3%,10.1%;位移延性系数  $\mu$  分别提高了 19.3%,17.1%,73.0%;黏滞阻尼系数  $h_e$  分别降低了 7.4%,9.3%,14.8%。空心率增大时构件自重同时减轻,使得构件的延性提高,耗能能力降低,但总体变化幅度较小。

当长细比  $\lambda$  为 40,60,80 时,水平峰值承载力分别为 421.4,234.7,179.8 kN,分别比  $\lambda$  为 20 时的水平峰值承载力 1 344 kN 降低了 68.1%,82.5%,86.6%;位移延性系数  $\mu$  分别降低了 81.9%,89.0%,92.0%;黏滞阻尼系数  $h_e$  分别降低了 6.4%,40.4%,61.7%。长细比对构件抗震性能影响最为显著,长细比较大时构件底部承受的弯矩更大,从而使构件的延性和耗能能力降低。

3.3 锥形构件与等截面构件抗震性能对比

对比不同截面尺寸的圆中空夹层钢管混凝土与圆锥形中空夹层钢管混凝土的抗震性能,以期了解圆锥形中空夹层钢管混凝土与何种截面的圆中空夹层钢管混凝土可以实现抗震性能指标上的等效。沿圆锥形中空夹层钢管混凝土高度方向提取不同截面高度的内、外钢管直径,建立圆中空夹层钢管混凝土构件的数值模型,分析对比上述构件的位移延性指标和耗能能力,截面选取示意如图 11 所示。图 12 为不同截面尺寸的圆中空夹层钢管混凝土和圆锥形中空夹层钢管混凝土滞回关系骨架曲线。

表 5 为不同截面圆中空夹层钢管混凝土和圆锥形中空夹层钢管混凝土的位移延性系数和黏滞阻尼系数。由表 5 可知,随着构件截面面积的减小,圆中空夹层钢管混凝土构件的位移延性系数呈增大趋势,黏滞阻尼系数呈减小趋势。变截面的锥形构件

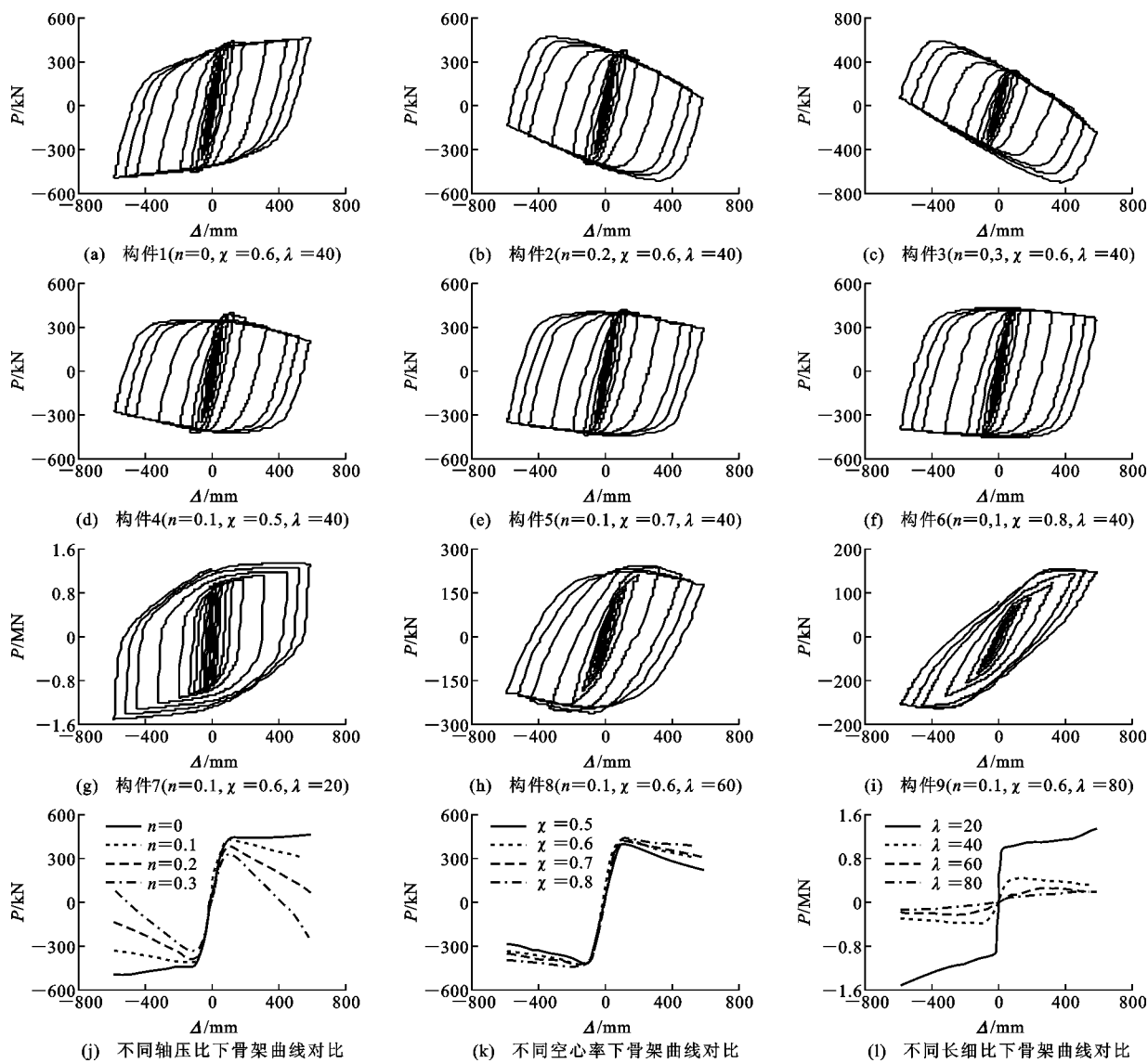


图 10 构件的  $P-\Delta$  滞回曲线和骨架曲线对比

Fig. 10 Comparisons of  $P-\Delta$  Hysteretic Curves and Skeleton Curves of Specimens

表 4 构件的延性指标与耗能能力

Tab. 4 Ductility Index and Energy Dissipation Ability of Specimens

构件编号	$\Delta_u/\text{mm}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$E_{\Delta y}$	$E_{1.5\Delta y}$	$E_{2\Delta y}$	$E_{3\Delta y}$	$E_{5\Delta y}$	$\mu$	$h_e$	对比参数
1	587.79	84.56	0.90	1.22	1.80	3.52	8.69	6.95	1.38	轴压比
2	200.27	76.10	0.81	1.07	1.60	2.73	4.45	2.63	0.71	
3	164.41	59.03	0.83	1.10	1.56	2.12	2.55	2.79	0.41	
4	265.34	70.93	0.84	1.13	1.60	2.38	3.37	3.74	0.54	空心率
5	353.72	80.61	0.76	1.02	1.41	2.25	3.06	4.38	0.49	
6	542.55	83.85	0.67	0.88	1.37	2.10	2.90	6.47	0.46	
7	588.84	23.92	2.48	2.61	2.64	2.84	2.94	24.60	0.47	长细比
8	475.94	175.61	0.58	0.78	0.93	1.05	1.75	2.71	0.28	
9	588.84	298.63	0.24	0.48	0.65	0.95	1.16	1.97	0.18	

相比等截面构件而言,其顶部尺寸较小,多余自重较少;与此同时保留较大的底部尺寸,保证其良好的抗弯能力,故变截面圆锥形中空夹层钢管混凝土构件

的位移延性系数大于任一截面尺寸的等截面圆中空夹层钢管混凝土构件。变截面圆锥形中空夹层钢管混凝土构件与 $L/4$ 处截面直径的圆中空夹层钢管



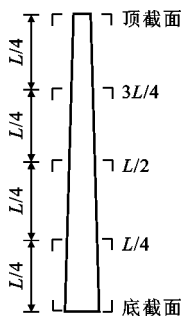


图 11 截面选取

Fig. 11 Section Selection

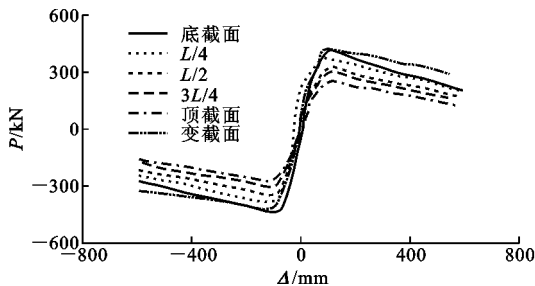


图 12 骨架曲线对比

Fig. 12 Comparisons of Skeleton Curves

表 5 构件的位移延性系数和黏滞阻尼系数

Tab. 5 Displacement Ductility Coefficient and Viscous Damping Coefficient of Specimens

截面位置	$\Delta_u/\text{mm}$	$\Delta_y/\text{mm}$	$\mu$	$h_e$
底截面	144.98	51.71	2.80	1.13
L/4	158.64	55.72	2.85	0.92
L/2	163.54	56.20	2.91	0.88
3L/4	162.36	51.43	3.16	0.67
顶截面	170.97	56.11	3.05	0.55
变截面	311.13	69.75	4.46	0.96

混凝土构件的耗能能力接近,但钢材使用量减小 6.89%,混凝土使用量减小 59.94%。

综上所述,轴压比和长细比对圆锥形中空夹层钢管混凝土构件抗震性能的影响较大,需明确其影响参数的范围,以保证圆锥形中空夹层钢管混凝土优良的抗震性能。圆锥形中空夹层钢管混凝土可在一定范围内替代圆中空夹层钢管混凝土。

## 4 结 语

(1)采用的数值模型考虑了混凝土在往复作用下的拉、压损伤,圆锥形中空夹层钢管混凝土的建模方法良好可行,模拟结果与试验结果拟合良好,数值模型可真实反映构件在往复荷载下的力学性能。

(2)圆锥形中空夹层钢管混凝土的强度指标、刚度退化指标、延性系数及耗能能力较好。

(3)轴压比和长细比对构件的抗震性能指标影响较大,需严格控制圆锥形中空夹层钢管混凝土的轴压比和长细比。

(4)圆锥形中空夹层钢管混凝土抗震性能指标和距其底部 1/4 高度处截面尺寸的圆中空夹层钢管混凝土相当,但材料用量大幅减少。圆锥形中空夹层钢管混凝土的抗震性能总体较好。

## 参考文献:

## References:

[1] HAN L H, HUANG H, TAO Z, et al. Concrete-filled Double Skin Steel Tubular (CFDST) Beam-columns Subjected to Cyclic Bending[J]. Engineering Structures, 2006, 28(12): 1698-1714.

[2] 李 斌, 杨晓云, 高春彦. 风力发电机锥台型塔筒和格构式塔架的抗震性能试验研究与对比分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(增 1): 161-166.

LI Bin, YANG Xiao-yun, GAO Chun-yan. Experimental Research and Comparative Analysis on Seismic Performance of Wind Turbine Frustum Tower Drum and Latticed Tower[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(S1): 161-166.

[3] WANG R, HAN L H, ZHAO X L, et al. Experimental Behavior of Concrete Filled Double Steel Tubular (CFDST) Members Under Low Velocity Drop Weight Impact[J]. Thin-walled Structures, 2015, 97: 279-295.

[4] 刘 扬, 鲁乃唯. 钢管混凝土组合高墩连续刚构桥体系可靠指标计算方法[J]. 公路交通科技, 2011, 28(9): 89-95.

LIU Yang, LU Nai-wei. Calculation of System Reliability Index of CFST Continuous Rigid Frame Bridge with High-rise Piers[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(9): 89-95.

[5] HUANG H, HAN L H, TAO Z, et al. Analytical Behaviour of Concrete-filled Double Skin Steel Tubular (CFDST) Stub Columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(4): 542-555.

[6] 陶 忠, 韩林海, 黄 宏. 圆中空夹层钢管混凝土柱力学性能研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(10): 41-51.

TAO Zhong, HAN Lin-hai, HUANG Hong. Mechanical Behaviour of Concrete-filled Double Skin Steel Tubular Columns with Circular Cular Sections[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(10): 41-51.

[7] 赵均海, 郭红香, 魏雪英. 圆中空夹层钢管混凝土柱承载力研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 50-54.



- ZHAO Jun-hai, GUO Hong-xiang, WEI Xue-ying. Research on Bearing Capacity of Concrete Filled Double Skin Steel Tubes Column[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 50-54.
- [8] 田宏伟, 赵均海, 魏 锦. 圆钢管混凝土轴压长柱的极限承载力[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(2): 74-79.
- TIAN Hong-wei, ZHAO Jun-hai, WEI Jin. Ultimate Bearing Capacity of Concrete-filled Circular Steel Tubular Long Columns with Axial Compression[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2007, 24(2): 74-79.
- [9] 卢方伟, 刘 晓, 李四平, 等. 中空夹层钢管混凝土柱力学性能研究[J]. 公路交通科技, 2007, 24(5): 76-80.
- LU Fang-wei, LIU Xiao, LI Si-ping, et al. Study on Mechanical Properties of Concrete-filled Double Skin Steel Tube Columns[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007, 24(5): 76-80.
- [10] 董崇海. 钢-混凝土组合结构风电塔架力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- DONG Chong-hai. Research on Mechanical Performance of Steel-concrete Composite Structure for Wind Turbine Tower[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [11] LI W, REN Q X, HAN L H, et al. Behaviour of Tapered Concrete-filled Double Skin Steel Tubular (CFDST) Stub Columns[J]. Thin-walled Structures, 2012, 57: 37-48.
- [12] LI W, HAN L H, REN Q X, et al. Behavior and Calculation of Tapered CFDST Columns Under Eccentric Compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 83: 127-136.
- [13] 任庆新, 刘绍鹏, 贾连光. 圆锥形钢管混凝土长柱力学性能研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(4): 32-36.
- REN Qing-xin, LIU Shao-peng, JIA Lian-guang. Research on Circular Tapered Concrete-filled Steel Tubular Long Columns[J]. Industrial Construction, 2014, 44(4): 32-36.
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2016.
- HAN Lin-hai. Concrete Filled Steel Tubular Structures — Theory and Practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [15] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- SHEN Ju-min, WANG Chuan-zhi, JIANG Jian-jing. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete and Limit Analysis of Plate and Shell[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [16] 李 威. 圆钢管混凝土柱-钢梁外环板式框架节点抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- LI Wei. Study on the Seismic Performance of Circular Concrete-filled Steel Tubular Column to Steel Beam Joint with External Diaphragm[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [17] BECK J, KIYOMIYA O. Fundamental Pure Torsional Properties of Concrete Filled Circular Steel Tubes[J]. Journal Materials, Construct Structure Pavements, 2003, 739(60): 285-296.
- [18] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程[S].
- JGJ/T 101—2015, Specification for Seismic Test of Buildings[S].
- [19] GB 50936—2014, 钢管混凝土结构技术规范[S].
- GB 50936—2014, Technical Code for Concrete Filled Steel Tubular Structures[S].
- [20] 杨俊芬, 胡盼盼, 闫西峰, 等. 圆钢管混凝土悬臂长柱压弯构件抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(11): 121-129.
- YANG Jun-fen, HU Pan-pan, YAN Xi-feng, et al. Research on Seismic Behavior of Beam-column Members of Long Cantilever Concrete-filled Circular Steel Tubes[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(11): 121-129.