

文章编号:1673-2049(2019)03-0037-09

# 圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压短柱受力机理分析

王文达,张超峰,王景玄,郑 龙

(兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**为了研究圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压短柱的受力机理,通过有限元软件 ABAQUS 建立了该类构件的力学模型,并与已有试验数据进行对比,验证了模型的合理性。分析了典型构件的受力全过程荷载-应变关系曲线、钢管与混凝土之间的相互作用力、破坏模态和荷载分配;同时分析了空心率、锥度、钢管径厚比和混凝土强度等参数对相互作用力的影响。结果表明:典型构件荷载-应变关系曲线可分为弹性段、弹塑性段、下降段和稳定段 4 个阶段;构件破坏是由外钢管向外鼓曲所导致的,破坏截面约在  $0.8H$  ( $H$  为构件高度)柱高处;锥度和空心率的改变对构件破坏截面位置影响较大,随着锥度和空心率的增大,破坏截面位置逐渐向柱顶靠近;影响外钢管与混凝土之间相互作用力的主要因素有空心率、锥度、外钢管径厚比、外钢管屈服强度和混凝土强度;影响内钢管与混凝土之间相互作用力的主要因素有空心率、锥度和外钢管屈服强度;内钢管径厚比与内钢管屈服强度对混凝土与内、外钢管之间的相互作用力影响较小,可不作为主要参数进行分析。

**关键词:**圆锥形中空夹层钢管混凝土;轴压;空心率;荷载-位移曲线;受力机理

**中图分类号:** TU398

**文献标志码:** A

## Analysis on Mechanical Behavior of Tapered Concrete-filled Double Steel Tubular Short Columns Under Axial Compression

WANG Wen-da, ZHANG Chao-feng, WANG Jing-xuan, ZHENG Long

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

**Abstract:** In order to study the mechanical behavior of tapered concrete-filled double steel tubular (CFDST) short columns under axial compression, the mechanical model was established by the ABAQUS software, and the results were compared with the existing experimental data to verify the rationality of the model. The load-displacement curve, interaction stress between steel tubes and concrete, failure modes and load distribution of typical member were investigated respectively. The hollow ratio, tapered angle, ratio of diameter and thickness of steel tube and concrete strength to the influence of interaction stress between steel tubes and concrete were also analyzed. The result indicates that the load-displacement curve of tapered CFDST short column is divided into elastic stage, elastic-plastic stage, descending stage and maintenance stage. The failure of the member is caused by the outward bending of the outer steel tube, and the fracture cross section is at the height of  $0.8H$  ( $H$  is the height of member). The changes of tapered angle and hollow section ratio have a great influence on the position of failure cross section, with the increase of tapered angle and hollow section ratio, the position of failure cross section is closer to the top of the column. The main factors affect the interaction stress between outer steel tube and

收稿日期:2018-09-18

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:王文达(1976-),男,甘肃天水人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wangwd@lut.cn.

concrete are hollow section ratio, tapered angle, ratio of diameter and thickness of outer steel tube, outer steel tube yield strength and concrete strength. The main factors affect the compressive stress between inner steel tube and concrete are hollow section ratio, tapered angle and outer steel tube yield strength. The ratio of diameter and thickness of inner steel tube and yield strength of inner steel tube have little effect on the compressive stress between steel tubes and concrete, and may not be analyzed as the main parameter.

**Key words:** tapered concrete-filled double steel tube; axial compression; hollow section ratio; load-displacement curve; mechanical behavior

## 0 引言

圆锥形中空夹层钢管混凝土是在 2 个同心放置的圆锥形钢管之间灌注混凝土而组成的构件,沿构件全长变截面;它既有普通钢管混凝土的基本优点,又具有截面开展、抗弯刚度大、自重轻等特点,在风力发电机、输电塔架、高架桥桥墩等工程领域有广阔的发展前景<sup>[1-2]</sup>。

对于圆中空夹层钢管混凝土的研究已有较多报道。陶忠等<sup>[3]</sup>进行了 14 个圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱试验研究,给出了轴压承载力计算公式。赵均海等<sup>[4]</sup>采用统一强度理论,提出了圆中空夹层钢管混凝土柱的极限承载力计算公式。黄宏等<sup>[5]</sup>通过 ABAQUS 分析了圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱受力过程中,混凝土与内、外钢管之间相互作用力的变化。Kojiro 等<sup>[6]</sup>进行了 12 个圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱试验研究,分析了构件破坏模式。目前关于圆锥形钢管混凝土的报道相对较少。Han 等<sup>[7]</sup>进行了 6 个圆锥形钢管混凝土轴压短柱试验研究,分析了其轴压工作机理和锥度对承载力的影响。任庆新等<sup>[8]</sup>对 5 组圆锥形中空夹层钢管约束混凝土短柱进行了轴向局压试验研究,分析了局压面积比、锥度、外钢管厚度和强度等参数对承载力的影响规律。Li 等<sup>[9]</sup>进行了 10 个圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压短柱试验研究,考察了锥度和截面尺寸对构件承载力和延性的影响规律,建议了轴压承载力计算公式。目前对于圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压短柱的研究及报道均是对构件破坏模式方面的分析<sup>[10-19]</sup>,对于混凝土应力分布、混凝土与内外钢管之间相互作用力等微观分析较少,而且对于该类轴压短柱承载力的计算方法也需要进一步探讨。

本文通过 ABAQUS 软件对圆锥形中空夹层钢管混凝土短柱在轴心受压工况下的工作机理进行了深入分析。通过模拟圆锥形中空夹层钢管混凝土短柱在轴压工况下的荷载-应变关系曲线对构件的力

学性能进行了分析;同时分析了受力过程中混凝土与钢管之间相互作用力的变化及空心率对混凝土与内、外钢管各自承担荷载峰值的影响;还分析了锥度和空心率对构件破坏模式的影响;考察了空心率、锥度、外钢管径厚比、内钢管径厚比和材料强度等参数对混凝土与钢管之间相互作用力的影响规律;在文献[9]研究的基础上对圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压短柱承载力计算方法进行了分析。

## 1 有限元模型

### 1.1 模型的建立

采用 ABAQUS 软件模拟圆锥形中空夹层钢管混凝土短柱在轴压工况下的受力全过程。钢材本构关系采用二次塑流模型<sup>[1]</sup>,混凝土的本构关系采用文献[20]提出的修正后的混凝土纵向应力-应变关系。混凝土和内外钢管以及端板均采用 8 节点缩减积分格式的三维实体单元 C3D8R。混凝土与内外钢管的界面模型由法向的接触和切向的黏结滑移组成;法向接触为“硬”接触;切向接触单元为面-面接触,采用库仑摩擦模型模拟界面切向力的传递,摩擦因数  $\mu$  取 0.25<sup>[5]</sup>。内外钢管和混凝土与端板之间采用“tie”绑定,以保证加载板与各部件之间没有相对滑移。

有限元模型如图 1 所示,其中, $N$  为荷载, $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  分别为  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  方向的位移。构件顶部约束上端板沿  $X$ ,  $Z$  方向的位移,并施加沿  $Y$  负方向的轴心位移荷载,由上端板传递给构件;构件底部为固定端约束,约束下端板沿  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  方向的位移。划分网格时将构件离散成单个部件分别划分,网格尺寸在纵向相同。

### 1.2 模型验证

采用上述建模方法对已有试验的 3 个圆中空夹层钢管混凝土轴压短柱和 3 个圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压短柱进行有限元模拟。表 1 为试件主要参数,荷载-应变( $N$ - $\epsilon$ )曲线的试验结果与有限元模

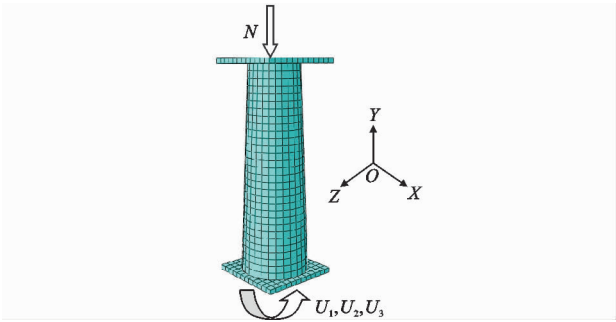


图 1 网格划分和边界条件  
Fig. 1 Mesh Division and Boundary Condition

拟结果对比如图 2 所示。从图 2 可以看出,有限元模拟轴压构件的前期刚度、承载力、后期延性均与试验结果吻合较好,说明建模方法合理,可用于有限元计算。

2 工作机理分析

2.1 荷载-位移关系

通过典型算例来模拟圆锥形中空夹层钢管混凝土短柱在轴压工况下的受力全过程,试件尺寸根据《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)<sup>[21]</sup>

表 1 试件主要参数  
Tab. 1 Main Parameters of Specimens

试件编号	$D_b/mm$	$D_t/mm$	$t_o/mm$	$H/mm$	$d_b/mm$	$d_t/mm$	$t_i/mm$	$H/mm$	$f_{cu}/MPa$	$f_{yo}/MPa$	$f_{yi}/MPa$	$\chi$	$\theta/(^\circ)$	数据来源
cc3	180	180	3.00	540	88	88	3.00	540	47.4	275.9	370.2	0.51		文献[3]
cc4	180	180	3.00	540	140	140	3.00	540	47.4	275.9	342.0	0.80		
cc5	114	114	3.00	342	58	58	3.00	342	47.4	294.5	374.5	0.54		
C2	350	329	3.82	1 050	231	210	2.92	1 050	52.5	439.3	396.5	0.67	0.57	文献[9]
C3	350	308	3.82	1 050	231	189	2.92	1 050	52.5	439.3	396.5	0.67	1.14	
C4	300	282	3.82	900	198	180	2.92	900	52.5	439.3	396.5	0.67	0.57	

注: $D_b, D_t$  分别为外钢管的底面直径和顶面直径; $d_b, d_t$  分别为内钢管的底面直径和顶面直径; $t_o, t_i$  分别为外钢管和内钢管的厚度; $H$  为构件高度; $f_{yo}, f_{yi}$  分别为外钢管和内钢管的屈服强度; $f_{cu}$  为混凝土立方体抗压强度; $\chi$  为空心率; $\theta$  为锥度。

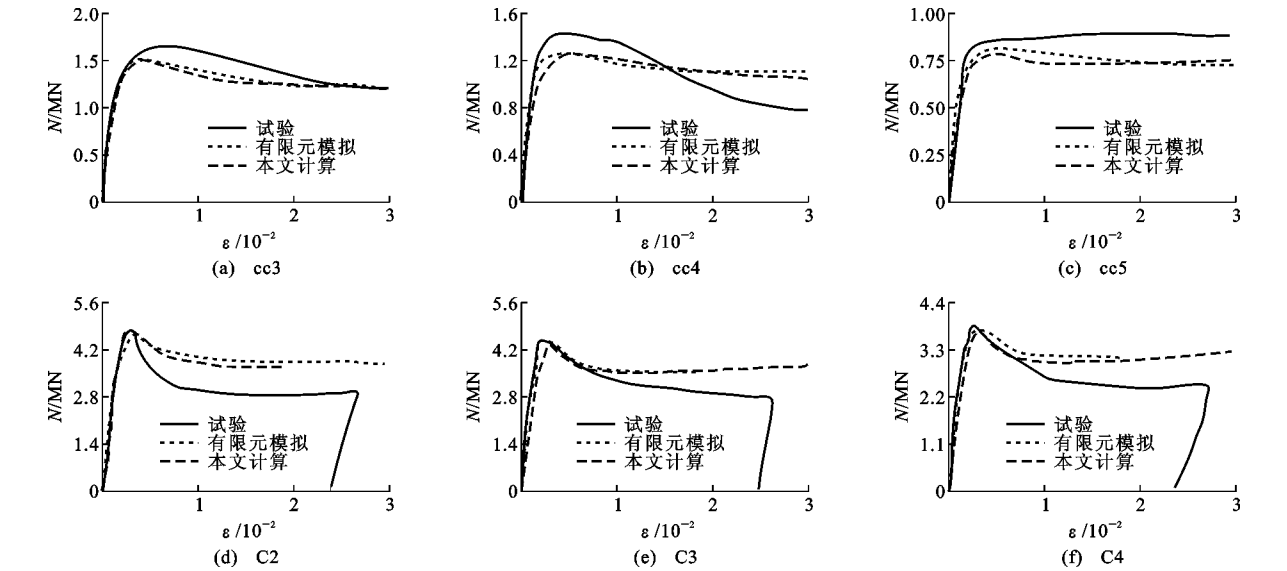


图 2  $N-\epsilon$  关系曲线的有限元结果与试验结果对比  
Fig. 2 Comparisons of  $N-\epsilon$  Curves Between Finite Element Results Tested Results

中规定的参数范围确定,基本参数为:外钢管底面直径  $D_b=350\text{ mm}$ ,外钢管顶面直径  $D_t=329\text{ mm}$ ,外钢管厚度  $t_o=4\text{ mm}$ ,内钢管底面直径  $d_b=205\text{ mm}$ ,内钢管顶面直径  $d_t=184\text{ mm}$ ,内钢管厚度  $t_i=3\text{ mm}$ ,构件高度  $H=1\text{ }050\text{ mm}$ ,锥度  $\theta=0.57^\circ$ ,空心率  $\chi=0.60$ ,混凝土立方体抗压强度  $f_{cu}=50\text{ MPa}$ ,内、外钢管屈服强度  $f_{yi}=f_{yo}=345\text{ MPa}$ 。

图 3 为典型圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压短

柱荷载-应变( $N-\epsilon$ )关系曲线。由图 3 可见,当轴压短柱达到极限承载力时,混凝土承担的荷载约为构件极限承载力的 54.7%,内、外钢管承担的荷载占比分别为 14.1%和 31.2%。由此可知:该构件受力过程中,混凝土承担的轴力最大,内钢管承担轴力最小,外钢管则介于两者之间;当混凝土达到荷载峰值点时整个构件达到极限承载力,而内、外钢管在混凝土达到荷载峰值点之前已经屈服进入塑性强化

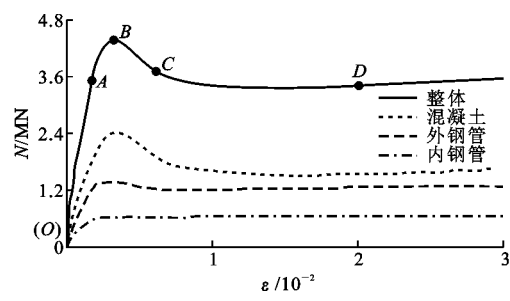


图 3 典型轴压构件  $N-\varepsilon$  关系曲线

Fig. 3 Typical  $N-\varepsilon$  Curves of Typical Members Under Axial Compression

阶段。

为便于分析,在荷载-应变( $N-\varepsilon$ )全过程曲线上取 4 个特征点:A 点为外钢管开始进入弹塑性阶段的点;B 点为构件达到极限承载力的点;C 点为荷载下降到极限承载力 85%左右的点;D 点为纵向微应变发展到  $2 \times 10^{-2}$  的点。图 4 为不同截面处各特征点混凝土纵向应力分布等值线,其中,  $f_c$  为圆柱体抗压强度。

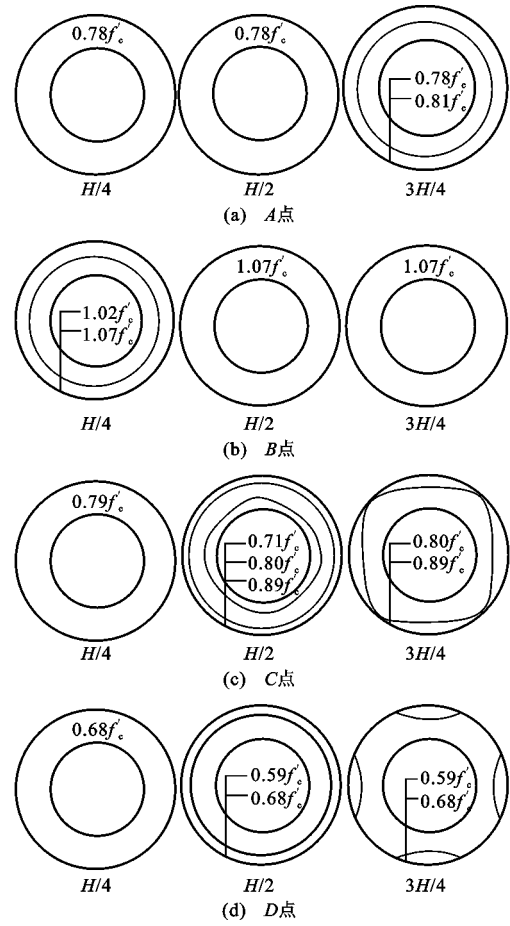


图 4 不同截面混凝土应力分布等值线

Fig. 4 Stress Distribution Contours of Concretes at Different Sections

由图 3,4 可知:

(1)弹性段 OA:初始阶段,混凝土和内外钢管独立地承载,当荷载增加到极限承载力的 80%左右时,外钢管开始进入弹塑性阶段,内钢管也随后开始进入弹塑性阶段。 $H/4, H/2, 3H/4$  各截面处混凝土纵向应力分布基本均匀,且各截面数值相等,约为  $0.78f_c$ 。

(2)弹塑性段 AB:此阶段混凝土纵向应力增幅较大,到 B 点时已经超过其圆柱体抗压强度  $f_c$ ,原因在于混凝土受到外钢管的约束作用和内钢管的支撑作用,使混凝土处于三向受压状态,混凝土抗压强度增大,构件承载力逐渐增大到极限承载力。 $H/4, H/2, 3H/4$  各截面处混凝土纵向应力分布仍然较为均匀,各截面数值基本相等,约为  $1.07f_c$ ,夹层混凝土已开裂。

(3)下降段 BC:B 点之后,荷载由峰值点开始下降,混凝土纵向应力也快速降低,此阶段外钢管向外凸曲,混凝土被压碎,内钢管也随之屈曲,荷载下降到约为极限承载力的 85%时构件破坏。在 C 点时,混凝土纵向应力的分布随着构件高度的降低而降低,由  $3H/4$  截面处的  $0.89f_c$  减小到  $H/4$  截面处的  $0.79f_c$ ,这是因为破坏部位发生在构件上部,上部混凝土受到钢管的约束作用更强。

(4)稳定段 CD:在这一阶段荷载下降较为缓慢,逐渐趋于稳定,约为极限承载力的 70%左右。在 D 点时, $H/4$  和  $H/2$  截面处混凝土应力分布较为均匀, $3H/4$  截面处不太均匀,这是由于下降段混凝土被压碎;边缘处混凝土应力大于内侧,说明外钢管的约束作用要强于内钢管。

2.2 混凝土与内、外钢管之间相互作用力

圆锥形中空夹层钢管混凝土结构在轴压工况下,夹层混凝土受压产生横向变形,外钢管的约束和内钢管的支撑使得钢管和混凝土之间存在着如图 5 所示的相互作用力  $p$ ,其中混凝土与外钢管之间的相互作用力记为  $p_1$ ,混凝土与内钢管之间的相互作用力记为  $p_2$  [5]。

图 6 为构件达到极限承载力时,  $p_1, p_2$  沿构件高度的变化,其中,  $h$  为构件底部到上部的距离。由图 6 可见,由于构件沿高度方向变截面及受到端板的影响,  $p_1, p_2$  在沿构件高度方向的值并不相等。在靠近上、下端板  $0 \sim 0.2H$  范围内  $p_1, p_2$  变化较大,中截面附近较为稳定,且构件上部相互作用力相对较大,在  $0.2H \sim 0.8H$  范围内  $p_1$  逐渐增大,这是因为上部截面较小,钢管对混凝土的约束作用相对

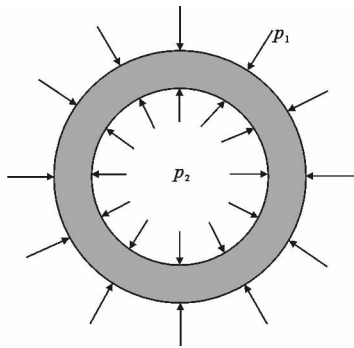


图 5 混凝土与钢管之间的相互作用力

Fig. 5 Interaction Force Between Concrete and Steel Tubes

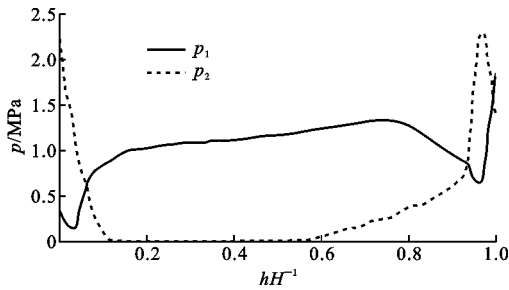


图 6 构件达到极限承载力时  $p_1, p_2$  沿构件高度的变化

Fig. 6 Change of  $p_1, p_2$  with Member Height when Member Reaches Ultimate Bearing Capacity

较大。在  $0.2H \sim 0.6H$  范围内  $p_2$  几乎为 0, 说明在这一高度范围, 内钢管和混凝土在接触面的法向没有发生相互作用, 这主要是因为破坏截面发生在构件上部, 受力过程中上部混凝土被压碎, 下部混凝土横向变形很小。

图 7 为构件破坏截面(约  $0.8H$  处)在受力全过程中相互作用力变化曲线。在初始阶段, 由于钢管的泊松比  $\mu_s$  ( $\mu_s = 0.3$ ) 大于混凝土泊松比  $\mu_c$  ( $\mu_c = 0.2$ ), 钢管的横向变形要大于混凝土, 所以初期外钢管与混凝土的相互作用力  $p_1$  为 0, 而内钢管对混凝土有微小的压应力<sup>[5]</sup>。之后混凝土微裂缝随着荷载的增加而不断发展, 混凝土的横向变形超过钢管, 外钢管对混凝土的约束作用力  $p_1$  开始增大, 内钢管对混凝土的压应力  $p_2$  逐渐减弱为 0。位移荷载继续增大, 外钢管开始屈服, 对混凝土的作用力有所下降,  $p_1$  出现下降段, 内钢管与混凝土的相互作用力  $p_2$  开始增大, 当混凝土被压实时, 外钢管对混凝土的约束力  $p_1$  又开始增大, 此时随着内钢管的屈服,  $p_2$  值有所下降, 在内钢管的强化段, 对混凝土支撑作用加强, 相互作用力  $p_2$  又开始增大, 内钢管进入二次塑流段时,  $p_2$  又开始下降。

### 2.3 锥度和空心率对破坏位置的影响

图 8 为圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压短柱的

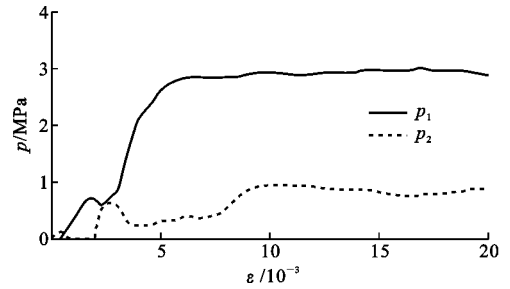


图 7 最不利截面相互作用力随纵向应变的变化

Fig. 7 Change of Interaction Force with Longitudinal Strain at Critical Section

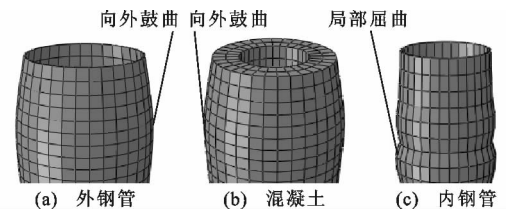


图 8 典型轴压短柱破坏模式

Fig. 8 Failure Modes of Typical Short Columns

### Under Axial Compression

钢管和混凝土破坏模式。从图 8 可以看出, 外钢管和混凝土都在构件上部(约  $0.8H$  处)发生了向外的鼓曲, 内钢管也在相同位置出现局部屈曲。构件受到轴力时, 夹层混凝土由于受到外钢管的约束和内钢管的支撑而处于三向受压状态, 既提高了混凝土抗压强度, 又有效阻止了混凝土横向变形, 混凝土则有效延缓了内、外钢管过早地发生局部屈曲, 最终由于外钢管的鼓曲使得构件破坏。

锥度  $\theta$  是外锥管母线和垂线的夹角, 如图 9 所示。图 10 和图 11 分别为锥度和空心率对构件破坏截面位置的影响。随着  $\theta$  的增大, 破坏截面逐渐上移,  $\theta$  由  $0.57^\circ$  增大到  $1.71^\circ$ , 最不利截面由  $0.8H$  处上移到  $0.87H$  处, 这是因为锥度越大, 构件上部截面越小, 有效承压面积越小, 所以最不利截面上移, 逐渐靠近柱顶。空心率对构件破坏截面位置的影响规律与锥度相同, 但空心率影响幅度相对锥度而言更大。空心率由 0.5 增大到 0.8 时, 最不利截面由  $0.76H$  处上移到  $0.9H$  处, 出现这一规律的原因与锥度相同, 空心率越大的构件内钢管直径越大, 使得相同截面尺寸下, 混凝土面积减小, 因而有效承压面积减小, 越靠近柱顶, 截面抗压能力越弱, 所以破坏截面逐渐上移。

### 2.4 空心率对各部件荷载峰值的影响

图 12 为空心率对钢管和混凝土各自承担的轴压荷载峰值的影响。随着空心率的增大, 混凝土承

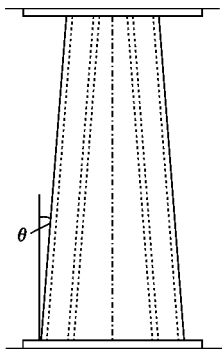


图 9 锥度示意图

Fig. 9 Schematic View of Tapered Angle

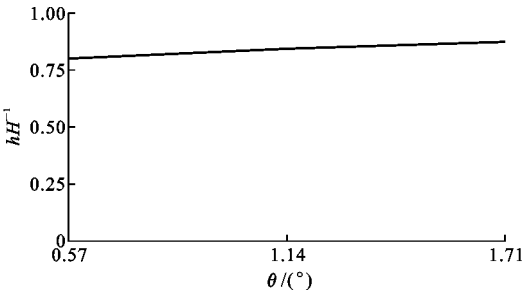


图 10 锥度对破坏截面位置的影响

Fig. 10 Influence of Tapered Angle on Position of Damaged Section

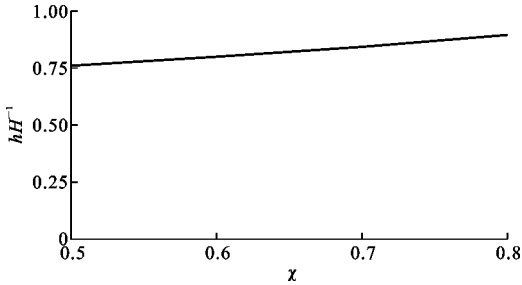


图 11 空心率对破坏截面位置的影响

Fig. 11 Influence of Hollow Ratio on Position of Damaged Section

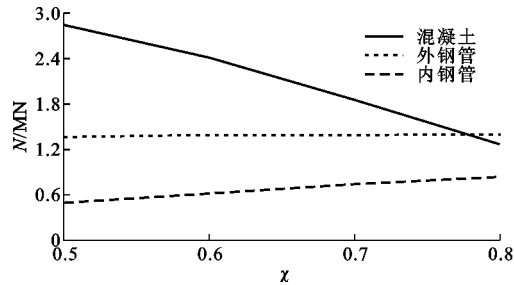


图 12 空心率对各部件荷载峰值的影响

Fig. 12 Influence of Hollow Ratio on Peak Load of Each Component

载峰值则随着空心率的增大而增大,当空心率由0.5增大到0.8时,内钢管的荷载峰值增大了39%。这是因为空心率越大,混凝土面积越小,混凝土的荷载峰值逐渐下降,内钢管相对弥补了缺失混凝土部分承担的荷载。

### 3 参数分析

为了研究空心率、锥度、钢管径厚比、混凝土强度等参数对破坏截面(0.8H柱高处)混凝土与内、外钢管之间相互作用力的影响规律,通过典型算例来论述各参数对相互作用力的影响,进行对比分析。

#### 3.1 空心率

图13为空心率对相互作用力变化曲线的影响。随着空心率的增大,混凝土与内外钢管之间的相互作用力均逐渐减小,原因在于空心率越大,混凝土有效承压面积越小;空心率越大的构件 $p_2$ 曲线的二次上升段出现越早。

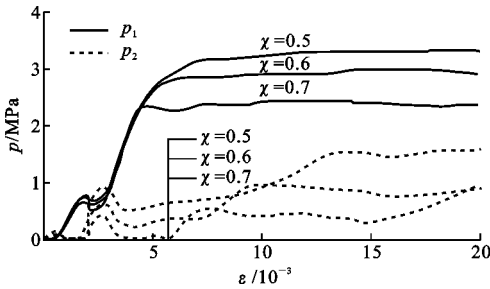


图 13 空心率对  $p-\epsilon$  关系曲线的影响

Fig. 13 Influence of Hollow Ratio on  $p-\epsilon$  Curve

#### 3.2 锥度

图14为锥度对相互作用力变化曲线的影响。从图14可以看出,随着锥度的增大,混凝土与内外钢管之间的相互作用力均增大,原因在于锥度越大的构件上部截面越小,钢管对混凝土约束作用越强。锥度对外钢管的相互作用力 $p_1$ 影响较大,对 $p_2$ 曲线后期影响较小。

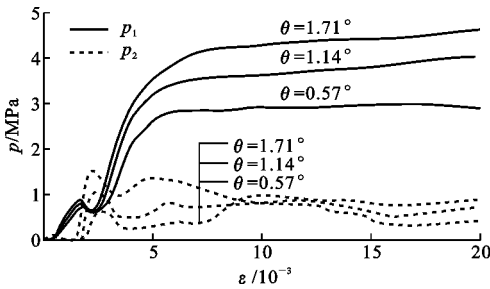


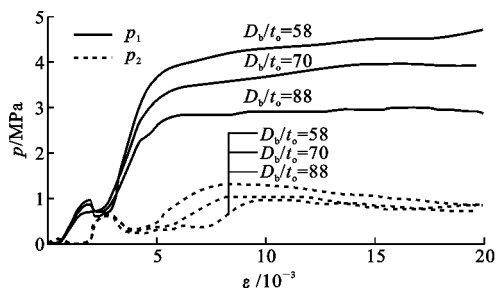
图 14 锥度对  $p-\epsilon$  关系曲线的影响

Fig. 14 Influence of Tapered Angle on  $p-\epsilon$  Curve

#### 3.3 外钢管径厚比

图15为外钢管径厚比( $D_b/t_o$ )对相互作用力变

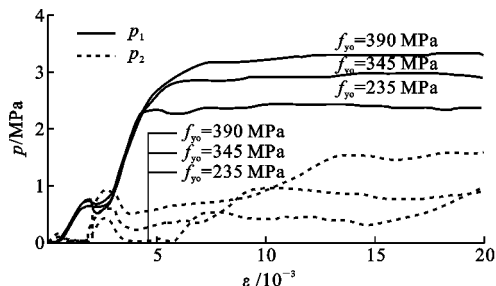
担的荷载峰值下降较大,空心率由0.5增大到0.8时,混凝土荷载峰值下降了55%。空心率对外钢管荷载峰值影响不大,荷载峰值基本持平,而内钢管荷

图15 外钢管径厚比对  $p$ - $\varepsilon$  关系曲线的影响Fig. 15 Influence of Ratio of Diameter and Thickness of Outer Steel Tube on  $p$ - $\varepsilon$  Curve

化曲线的影响,通过变化外钢管壁厚来取不同的径厚比。从图15可以看出,随着外钢管径厚比的增大, $p_1$ ,  $p_2$  均逐渐减小,原因在于外钢管径厚比越大,构件截面的含钢率越小,外钢管对混凝土的约束作用就越小。外钢管径厚比对  $p_2$  影响较小,初始阶段几乎没有影响。

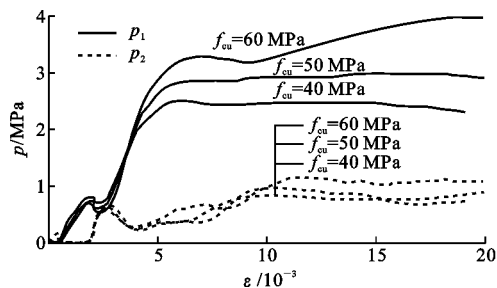
### 3.4 外钢管屈服强度

图16为外钢管屈服强度对相互作用力变化曲线的影响。由图16可知,外钢管屈服强度对相互作用力  $p_1$ ,  $p_2$  影响较大, $p_1$ ,  $p_2$  均随着外钢管屈服强度的增大而增大,且增幅明显,原因在于外钢管屈服强度越大,对混凝土的约束作用就越强,混凝土横向变形速度减弱,内钢管与混凝土之间的相互作用力同时加强<sup>[5]</sup>,外钢管屈服强度越大, $p_2$  曲线的二次上升段出现越早。

图16 外钢管屈服强度对  $p$ - $\varepsilon$  关系曲线的影响Fig. 16 Influence of Yield Strength of Outer Steel Tube on  $p$ - $\varepsilon$  Curve

### 3.5 混凝土强度

图17为混凝土强度对相互作用力变化曲线的影响。从图17可以看出,随着混凝土强度的增大, $p_1$  逐渐增大且增幅较大,这是因为混凝土强度越大,承担的荷载就越大,混凝土的横向变形越大,外钢管对混凝土的约束作用就越强。混凝土强度对相互作用力  $p_2$  影响不大,初始阶段对  $p_2$  曲线几乎没有影响,混凝土强度越大, $p_2$  曲线后期二次上升段出现相对越晚。

图17 混凝土强度对  $p$ - $\varepsilon$  关系曲线的影响Fig. 17 Influence of Concrete Strength on  $p$ - $\varepsilon$  Curve

## 4 承载力计算方法

文献[9]运用“等效截面强度”概念来计算圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压短柱的强度承载力  $N_{u,for}$ ,计算方法采用“叠加法”,即将外钢管与混凝土的承载力和内钢管的承载力相叠加,其中计算外钢管与混凝土的承载力时考虑了外钢管对混凝土的约束作用,具体表达式如下

$$N_{u,for} = N_{osc,u} + N_{i,u} \quad (1)$$

$$N_{osc,u} = f_{scy} (A_{so} + A_c) \quad (2)$$

$$f_{scy} = C_1 \chi^2 f_{yo} + C_2 (1.14 + 1.02 \xi_0) f_{ck} \quad (3)$$

式中: $N_{osc,u}$ 为外钢管和混凝土的极限承载力; $N_{i,u}$ 为内钢管的极限承载力, $N_{i,u} = f_{yi} A_{si}$ , $A_{si}$ 为内钢管截面面积; $A_{so}$ , $A_c$ 分别为外钢管和混凝土截面面积; $C_1$ , $C_2$ 为计算系数, $C_1 = \alpha / (1 + \alpha)$ , $C_2 = 1 + \alpha_n / (1 + \alpha)$ , $\alpha$ , $\alpha_n$ 分别为含钢率和名义含钢率, $\alpha = A_{so} / A_c$ , $\alpha_n = A_{so} / A_{ce}$ , $A_{ce}$ 为外钢管截面内部所包含的空隙面积, $A_{ce} = \pi (D_o - 2t_o)^2 / 4$ , $D_o$ 为外钢管截面外直径; $\xi_0$ 为截面约束效应系数, $\xi_0 = \alpha_n f_{yo} / f_{ck}$ , $f_{ck}$ 为混凝土抗压强度。

文献[9]中在计算承载力时,等效截面选取的是构件顶面,但本文在进行有限元模拟时发现,由于端板的影响,破坏截面大约在  $0.8H$  柱高处,本文采用文献[9]中的公式和试验结果,选取  $0.8H$  柱高处截面计算构件承载力,将计算结果与试验结果以及有限元计算结果进行对比分析,结果如表2所示。

由表2可以看出:等效截面取顶面时承载力计算值与试验值之比( $N_{u,for}^1 / N_{um}$ )的平均值为0.92,均方差为0.014;等效截面取  $0.8H$  柱高处时承载力计算值与试验值之比( $N_{u,for}^2 / N_{um}$ )的平均值为0.93,均方差为0.018,说明等效截面取  $0.8H$  柱高处计算时更接近实际情况;承载力有限元模拟值与试验值之比( $N_{u,FEA} / N_{um}$ )的平均值为0.94,均方差为0.019,说明本文提供的建模方法较为合理。

表 2 承载力试验值与计算值对比

Tab. 2 Comparison of Bearing Capacity Between Tested Results and Calculated Results

试件 编号	$N_{um}/$ kN	$N_{u,FEA}/$ kN	$N_{u,FEA}/$ $N_{um}$	$N_{u,for}^1/$ kN	$N_{u,for}^1/$ $N_{um}$	$N_{u,for}^2/$ kN	$N_{u,for}^2/$ $N_{um}$
C2-1	4 942	4 590	0.93	4 570	0.92	4 571	0.92
C2-2	4 921	4 590	0.93	4 570	0.93	4 571	0.93
C3-1	4 569	4 364	0.96	4 226	0.92	4 323	0.95
C3-2	4 600	4 364	0.95	4 226	0.92	4 323	0.94
C4-1	3 874	3 714	0.96	3 649	0.94	3 664	0.95
C4-2	4 048	3 714	0.92	3 649	0.90	3 664	0.91
C5-1	3 090	2 835	0.92	2 818	0.91	2 825	0.91
C5-2	3 116	2 835	0.91	2 818	0.90	2 825	0.91
平均值			0.94		0.92		0.93
均方差			0.019		0.014		0.018

注： $N_{um}$ 为承载力试验值； $N_{u,FEA}$ 为承载力有限元模拟值； $N_{u,for}^1$ 为等效截面取顶面时承载力计算值； $N_{u,for}^2$ 为等效截面取0.8*H*柱高处时承载力计算值。

通过对比分析发现,将等效截面取 0.8*H* 柱高处时,计算结果与试验结果以及有限元模拟结果更接近,建议采用等效截面计算构件承载力时,将等效截面取 0.8*H* 柱高处计算。

5 结 语

(1)通过 ABAQUS 软件模拟圆锥形中空夹层钢管混凝土短柱在轴压工况下的受力全过程,计算得到的荷载-应变关系曲线与试验曲线较为吻合,说明此建模方法可用于该类构件轴压工作机理分析。

(2)圆锥形中空夹层钢管混凝土轴压短柱的破坏是由外钢管向外鼓曲所导致的,破坏截面在约 0.8*H*柱高处;随着锥度和空心率的增大,破坏截面位置有向柱顶靠近的趋势;荷载-应变曲线可以用弹性段、弹塑性段、下降段和稳定段共 4 个阶段来描述。

(3)对外钢管与混凝土相互作用力影响较大的因素有空心率、锥度、外钢管径厚比、外钢管屈服强度和混凝土强度。对内钢管与混凝土相互作用力影响较大的因素有空心率、锥度和外钢管屈服强度。内钢管径厚比与内钢管屈服强度对混凝土与内、外钢管之间的相互作用力影响较小,可不作为主要参数进行分析。

参考文献:  
References:

[ 1 ] 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 Struc-

tures — Theory and Practice[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.  
[ 2 ] 黄 宏. 中空夹层钢管混凝土压弯构件的力学性能研究[D]. 福州: 福州大学, 2006  
HUANG Hong. Behavior of Concrete Filled Double-skin Steel Tubular Beam-columns [ D ]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.  
[ 3 ] 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.  
[ 4 ] 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(3): 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(3): 50-54.  
[ 5 ] 黄 宏, 陶 忠, 韩林海. 圆中空夹层钢管混凝土柱轴压工作机理研究[J]. 工业建筑, 2006, 36(11): 11-14, 36.  
HUANG Hong, TAO Zhong, HAN Lin-hai. Mechanism of Concrete-filled Double-skin Steel Tubular Columns (CHS Inner and CHS Outer) Subjected to Axial Compression[J]. Industrial Construction, 2006, 36(11): 11-14, 36.  
[ 6 ] KOJIRO U, HIROAKI K, KEIICHIRO S. Concrete Filled Double Skin Circular Stub Columns Under Compression[J]. Thin-walled Structures, 2010, 48(1): 19-24.  
[ 7 ] HAN L H, REN Q X, LI W. Tests on Inclined, Tapered and STS Concrete-filled Steel Tubular (CFST) Stub Columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(10): 1186-1195.  
[ 8 ] 任庆新, 默亚卿, 贾连光, 等. 圆锥形中空夹层钢管约束混凝土短柱轴向局压力学性能分析[J]. 工业建筑, 2013, 43(4): 144-148.  
REN Qing-xin, MO Ya-qing, JIA Lian-guang, et al. Analysis of Conical Double Skin Steel Tubes Confined Concrete Stub Columns Subjected to Axial Partial Compression[J]. Industrial Construction, 2013, 43(4): 144-148.  
[ 9 ] 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.



- [10] 赵均海,孟晓健,刘建军,等.圆中空夹层钢管混凝土短柱的承载力[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(1):70-74.  
ZHAO Jun-hai, MENG Xiao-jian, LIU Jian-jun, et al. Bearing Capacity of Concrete-filled Double-skin Steel-tube Stub Column[J]. Journal of Chang'an University: Nature Science Edition, 2009, 29(1): 70-74.
- [11] WANG Z B, LIU L Y. Finite Element Modelling of Concrete-filled Steel Tube Reinforced Concrete Stub Columns Under Axial Compression[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 351: 138-142.
- [12] HUAGN 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.
- [13] TAO Z, HAN L H, ZHAO X L. Behaviour of Concrete-filled Double Skin (CHS inner and CHS Outer) Steel Tubular Stub Columns and Beam-columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2004, 60(8): 1129-1158.
- [14] 任庆新,吕艳波,贾连光,等.带端板圆锥形中空夹层钢管混凝土短柱轴向局压力学性能研究[J].工业建筑,2013,43(4):149-155.  
REN Qing-xing, LU Yan-bo, JIA Lian-guang, et al. Mechanical Behavior of Conical Concrete-filled Double-skin Steel Tubular Stub Columns with Endplate Under Axial Partial Compression[J]. Industrial Construction, 2013, 43(4): 149-155.
- [15] REN Q X, HAN L H, HOU C, et al. Experimental Behaviour of Tapered CFST Columns Under Combined Compression and Bending[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 128: 39-52.
- [16] ZHANG Y B, HAN L H, LI W. Analytical Behaviour of Tapered CFDST Stub Columns Under Axially Partial Compression[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 139: 302-314.
- [17] HAN L H, TAO Z, HUANG H, et al. Concrete-filled Double Skin (SHS Outer and CHS Inner) Steel Tubular Beam-columns [J]. Thin-walled Structures, 2004, 42(9): 1329-1355.
- [18] 江 韩,储良成,左 江,等.轴心受压双钢管混凝土短柱正截面受压承载力理论分析及试验研究[J].建筑结构学报,2008,29(4):96-105.  
JIANG Han, CHU Liang-cheng, ZUO Jiang, et al. Theoretical Analysis and Experimental Study on Normal Cross-section Load-carrying Capacity for Concrete-filled Double Steel Tubular Short Columns Subjected to Axial Compression Load [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 96-105.
- [19] 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.
- [20] 刘 威,韩林海. ABAQUS 分析钢管混凝土轴压性能的若干问题研究[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(增):157-160.  
LIU Wei, HAN Lin-hai. Research on Some Issues of ABAQUS Analysis on the Behavior of Axially Loaded Concrete-filled Steel Tubes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(S): 157-160.
- [21] 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].