

# 圆多腔体中空钢管混凝土抗扭承载力分析

Torsional Bearing Capacity Analysis of Concrete-filled Circular Hollow Steel Tubular with Multi-cavities

马江萍

(西安培华学院 智能科学与工程学院, 西安 710125)

**摘要:** 为分析圆多腔体中空钢管混凝土柱的抗扭承载力, 在单向加载与往复加载下, 进行了以轴压比与截面形式为基本参数的 24 根柱模型的抗扭承载力分析。结果表明: 圆多腔体中空夹层钢管混凝土柱模型较圆中空夹层钢管混凝土柱模型有较强的抗扭承载力; 单向加载时圆四腔体中空夹层钢管混凝土柱模型在轴压比 $\leq 0.4$  时具有显著的抗扭延性, 圆六腔体中空钢管混凝土柱模型在轴压比 0~0.6 均具有较好的抗扭承载力及延性; 往复加载中圆多腔体中空夹层钢管混凝土柱模型较圆中空夹层钢管混凝土柱模型抗扭承载力增幅较大。

**关键词:** 圆多腔体中空钢管; 轴压比; 有限元分析; 抗扭承载力

中图分类号: TU398.9 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0102-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.018

MA Jiangping

(School of Intelligent Science and Engineering, Xi'an Peihua University, Xi'an 710125, China)

**Abstract:** In order to study the torsional bearing capacity of circular multi-cavity hollow concrete filled steel tubular columns, the torsional bearing capacity of 24 column models with axial compression ratio and section form as basic parameters under uniaxial and reciprocating loading is analyzed. The results show that the concrete filled circular multi-cavity hollow steel tube model has stronger torsional bearing capacity than the concrete filled circular hollow steel tube model. When the axial compression ratio $\leq 0.4$ , the model of circular four-cavity hollow sandwich concrete filled steel tube columns under uniaxial loading has remarkable torsion resistance, concrete filled hollow steel tubular columns with circular six cavities have good torsional capacity and ductility under axial compression ratio of 0~0.6, the torsional bearing capacity of the circular multi-cavity hollow concrete filled steel tube column model under reciprocating loading is larger than that of the circular hollow concrete filled steel tube model.

**Key words:** round multi-cavity hollow steel tube; axial compression ratio; finite element analysis; torsional bearing capacity

## 0 引言

钢管混凝土因较高的承载力与良好的塑性韧性, 在现代工程结构中被广泛应用<sup>[1-2]</sup>。圆多腔体中空钢管混凝土柱是由复式中空钢管混凝土柱以及分腔板组合而成。在协同受力过程中分腔钢管发挥套箍作用为核心混凝土提供约束力, 延迟并减小混凝土纵向开裂, 提高其承载能力; 核心混凝土与分腔板也为内外钢管壁提供了侧向支撑与拉结, 有利于延缓或避免钢管过早发生局部屈曲, 有助材料性能的充

基金项目: 陕西省“十四五”教育科学规划 2024 年度课题 (SGH24Y2680); 西安培华学院 2023 年度校级科研项目 (PHKT2303)。

作者简介: 马江萍 (1983—), 女, 硕士, 教授, 研究方向: 建筑结构。

收稿日期: 2024-02-23

分发挥<sup>[3]</sup>。

国内学者对多腔体钢管混凝土结构的受力性能做了一些理论与试验研究,曹万林等<sup>[4-5]</sup>进行了1:12缩尺的三个多腔体钢管混凝土巨型柱与8个方钢管高强混凝土墩状试件轴压性能试验研究,指出多腔体钢管相比单腔体钢管对腔内核心混凝土的复合约束作用更强,更有利于提高构件的抗压强度与刚度。王立长等<sup>[6]</sup>、曹万林等<sup>[7]</sup>进行了1:5缩尺的五边形截面钢管混凝土巨型柱受压性能试验,五边形截面钢管混凝土柱分腔后较单腔体截面试件承载力和延性明显提高,并且残余变形较小,耗能能力较强;外钢管板厚对构件承载能力和变形能力影响显著;钢管混凝土柱内分腔隔板和竖向加劲肋板厚度对试件承载力略有影响,但对柱抗弯刚度与外钢管稳定性的影响明显。张建伟等<sup>[8]</sup>以实际工程中的巨型柱截面为参考原型,进行了5个不同构造措施的八边形多腔体钢管混凝土巨型柱模型的有限元计算分析,结果表明异形截面多腔体钢管混凝土巨型柱中设置分腔板、竖向肋板以及在塑性铰域设置角钢的构造措施有助于抗震性能的提高。董宏英等<sup>[9]</sup>进行了1:4缩尺的6个不同腔体构造措施的矩形钢管混凝土柱轴压性能试验,研究表明,在腔体内设置横隔板,使其协同钢管工作,有利于强化钢管对核心混凝土的空间约束,有利于提高柱的承载力,延缓柱的刚度退化。武海鹏等<sup>[10-11]</sup>基于异形截面多腔钢管混凝土巨型柱轴压承载力试验结果与“统一理论”的精确计算,提出了异形截面多腔钢管混凝土柱轴压承载力的方法。李斌等<sup>[12]</sup>进行了9个多腔体方钢管混凝土柱的轴压试验,徐礼华等<sup>[13]</sup>进行了11根多腔式多边形钢管混凝土柱偏压静力试验,研究表明内部设置分腔板后的方钢管混凝土试件与多边形试件,具有良好的延性与变形性能。廖栩等<sup>[14]</sup>对中空夹层钢管混凝土试件以轴压比及截面尺寸为参数进行了压-扭试验,分析了扭转全过程截面剪应变开展及钢管与夹层混凝土的相互作用力。

上述研究主要针对异型截面多腔体钢管混凝土结构,研究主要集中在截面形式为多边形的钢管混凝土构件在压、弯、扭受力下的力学性能与抗震性能。针对圆多腔体中空截面形式的钢管混凝土研究

较少,为进一步探究腔体构造形式对复式钢管混凝土力学性能的影响,此次研究基于文献[14]的试验条件采用有限元软件分析了轴压比与腔体构造形式对圆多腔体中空钢管混凝土柱抗扭承载力的影响规律。

## 1 有限元验证

### 1.1 材料本构

利用有限元软件Abaqus对文献[14]中圆中空夹层钢管混凝土试件CC1~CC4的压-扭试验进行有限元模拟分析。采用三维实体单元(C3D8R)进行内外钢管和夹层混凝土的建模分析。考虑到钢管对混凝土的约束效应,混凝土本构采用文献[15]提出的圆钢管混凝土柱考虑约束效应的应力-应变关系,通过下式计算:

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\beta_0(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{其中, } x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}, y = \frac{\sigma}{\sigma_0}, \sigma_0 = f_c,$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_c + 8\xi^{0.2} \cdot 10^{-4}, \xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} = \frac{\alpha f_y}{f_{ck}},$$

$$\varepsilon_c = (1300 + 12.5f_c) \cdot 10^{-6},$$

$$\beta_0 = 0.5f_c^{0.5} (2.36 \times 10^{-5})^{[0.25 + (\xi - 0.5)^7]} \geq 0.12.$$

钢材本构采用五段式二次塑流模型:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_e \\ -A\varepsilon^2 + B\varepsilon + C & \varepsilon_e < \varepsilon \leq \varepsilon_{e1} \\ f_y & \varepsilon_{e1} < \varepsilon \leq \varepsilon_{e2} \\ \left[ 1 + \frac{0.6(\varepsilon - \varepsilon_{e2})}{\varepsilon_{e3} - \varepsilon_{e2}} \right] f_y & \varepsilon_{e2} < \varepsilon \leq \varepsilon_{e3} \\ 1.6f_y & \varepsilon_{e3} < \varepsilon \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $E_s$  为钢材的弹性模量;  $f_y$  为钢材的屈服强度。

$$\text{其中, } \varepsilon_e = \frac{0.8f_y}{E_s}, \varepsilon_{e1} = 1.5\varepsilon_e, \varepsilon_{e2} = 10\varepsilon_{e1}, \varepsilon_{e3} = 100\varepsilon_{e1},$$

$$A = \frac{0.2f_y}{(\varepsilon_{e1} - \varepsilon_e)^2}, B = 2A\varepsilon_{e1}, C = 0.8f_y + A\varepsilon_e^2 - B\varepsilon_e.$$

## 建筑结构

### 1.2 有限元模型的建立

模型的截面尺寸、加载方式以及约束方式均同文献 [14] 的试验情况一致。内外钢管与混凝土之间采用“法向行为”和“切向行为”模拟面-面接触关系,法向行为选择“硬”接触,切向行为通过“罚”接触来定义,摩擦系数为 0.6。在模型柱下端截面圆心处设置一个耦合点 RP1,使底部截面完全固定。在模型柱上端截面圆心处设置了一耦合点 RP2 施加轴压力与扭转角,且该点  $U_x = U_y = UR_x = UR_y = 0$ ,如图 1 (a) 所示。

网格划分时考虑计算精度,在柱高方向采用 20 mm 边长的网格对模型进行划分。为了使内外钢管与混凝土在横截面上划分的网格连续,内外钢管与夹层混凝土在圆周上设置了相同数量的网格,如图 1 (b) 所示。

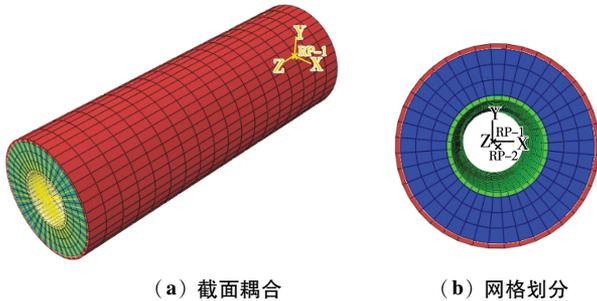


图 1 有限元模型  
Fig. 1 Finite element model

### 1.3 有限元结果与试验结果对比

在施加扭矩的过程中,随着扭转角度(扭矩)增大可以观察到构件发生了明显的扭转变形,对比如图 2 所示。

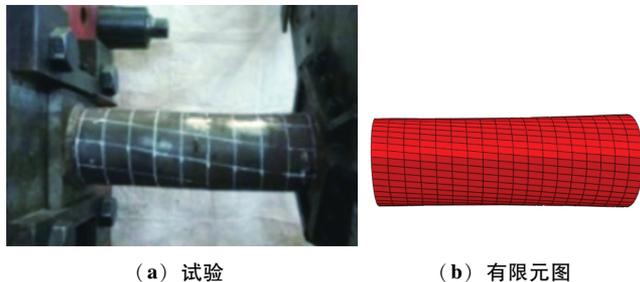
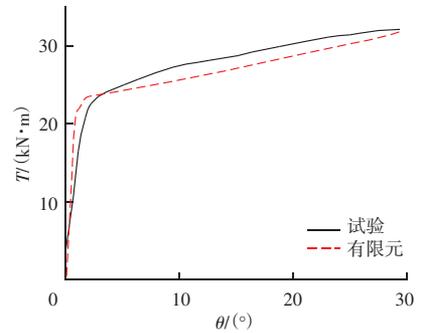


图 2 试验与有限元变形对比

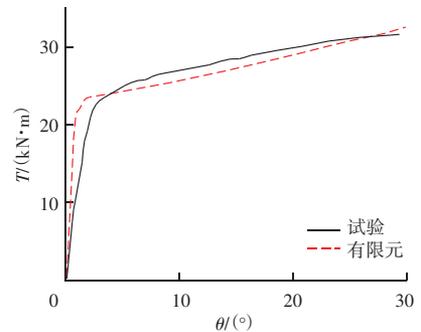
Fig. 2 Deformation comparison between experiment and finite

文献 [14] 试验与有限元模拟所得  $T-\theta$  曲线如图 3 所示,汇总轴压比 0~0.3 时,有限元模拟中模型的受扭承载力与试验中试件的受扭承载力见表 1。与试验结果相比,有限元计算的标准差仅为

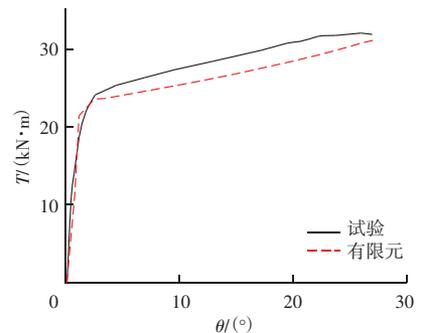
0.015,这表明本文建立的有限元模型能够较为准确模拟圆多腔体中空夹层钢管混凝土柱的受扭承载力。



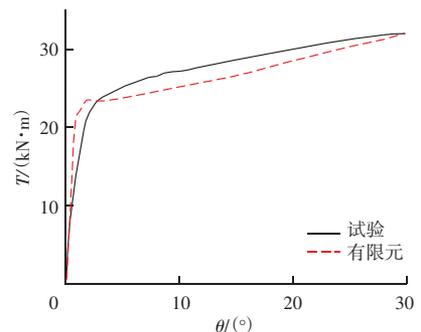
(a) 试件 CC1



(b) 试件 CC2



(c) 试件 CC3



(d) 试件 CC4

图 3 试验与有限元的  $T-\theta$  对比图

Fig. 3  $T-\theta$  contrast diagram of experiment and finite element

表 1 抗扭承载力对比  
Table 1 Comparison of torsional capacity simulated by finite element method

试件编号	$T/$ (kN·m)	$T_u/$ (kN·m)	$T/T_u$
CC1	23.75	25.87	0.91
CC2	23.71	25.61	0.93
CC3	23.73	26.67	0.89
CC4	23.48	26.09	0.90
均值			0.91
标准差			0.015

注： $T$ 、 $T_u$  分别为模拟和试验测得试件的抗扭极限承载力。

## 2 有限元参数拓展分析

### 2.1 模型参数设计

对圆多腔体中空钢管混凝土柱的参数进行拓展分析。设计了 6 组模型，6 组模型中内外钢管、混凝土横截面尺寸均与试验一致，内外钢管以及混凝土材料属性也均与试验相同。各组内柱高与剪跨比保持不变，对轴压比与轴压力进行调整；各组之间保持分腔板厚度不变，为 2 mm，调整分腔板数量，模型参数见表 2，圆六腔体中空钢管混凝土柱截面形式如图 4 所示，其他腔体模型截面除分腔板数量有差异外，内外钢管、混凝土及分腔板厚度均相同。

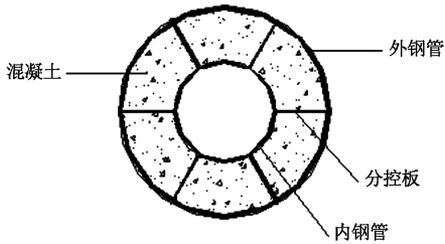


图 4 模型截面形式  
Fig. 4 Model section form

### 2.2 单向加载下轴压比对抗扭承载力影响

对 6 组模型实施与试验相同的加载方式与约束方式，通过改变轴压力（轴压比）来分析模型抗扭承载力的变化， $T-\theta$  对比如图 5 所示。

$T-\theta$  曲线在加载初期基本重合，但随扭转角的逐渐增大，模型的承载力出现了差异：在转角达到 30° 时，随着轴压比从 0 增大至 0.6，圆中空夹层钢管混凝土柱模型（A 组模型）的抗扭承载力先增后减，模型抗扭承载力最终下降 12.8%，圆两腔体中空夹层钢管混凝土柱模型（B 组模型）的抗扭承载

表 2 模型参数

Table 2 Model parameters

组别	模型编号	柱高/mm	分腔数	轴压比 $n$	轴压力 $N/kN$
A	A1	360			
	A2	360		0.2	183.6
	A3	360		0.4	367.2
	A4	360		0.6	550.8
B	B1	360	2		
	B2	360	2	0.2	190
	B3	360	2	0.4	380
	B4	360	2	0.6	570
C	C1	360	3		
	C2	360	3	0.2	193.2
	C3	360	3	0.4	386.4
	C4	360	3	0.6	579.6
D	D1	360	4		
	D2	360	4	0.2	196.4
	D3	360	4	0.4	392.8
	D4	360	4	0.6	589.2
E	E1	360	5		
	E2	360	5	0.2	199.6
	E3	360	5	0.4	399.2
	E4	360	5	0.6	598.8
F	F1	360	6		
	F2	360	6	0.2	202.8
	F3	360	6	0.4	405.6
	F4	360	6	0.6	608.4

力下降了 5.8%，圆三腔体中空夹层钢管混凝土柱模型（C 组模型）的抗扭承载力下降 8.0%，圆四腔体中空夹层钢管混凝土柱模型（D 组模型）抗扭承载力仅下降 3.0%，圆五腔体中空夹层钢管混凝土柱模型（E 组模型）的抗扭承载力下降 7.6%，圆六腔体中空夹层钢管混凝土柱模型（F 组模型）的抗扭承载力下降 6.4%，主要是由于分腔板的拉结在轴向压力较大时能有效抑制外钢管的环向屈曲变形，且使内钢管的作用充分发挥。通过分析可知，在较大轴压比的情况下，圆多腔体中空夹层钢管混凝土柱模型较圆中空夹层钢管混凝土柱模型抗扭承载力的增幅更为明显。

### 2.3 往复加载下轴压比对抗扭承载力影响

以 A、B、C 三组模型为例，分析往复荷载作用对圆中空夹层钢管混凝土柱模型与圆多腔体中空夹层钢管混凝土柱模型抗扭承载力的影响。在基于 Abaqus 有限元分析中采用位移控制的完全加载方式，按照扭转角幅值 0.052 rad (3°)、0.104 rad (6°)

## 建筑结构

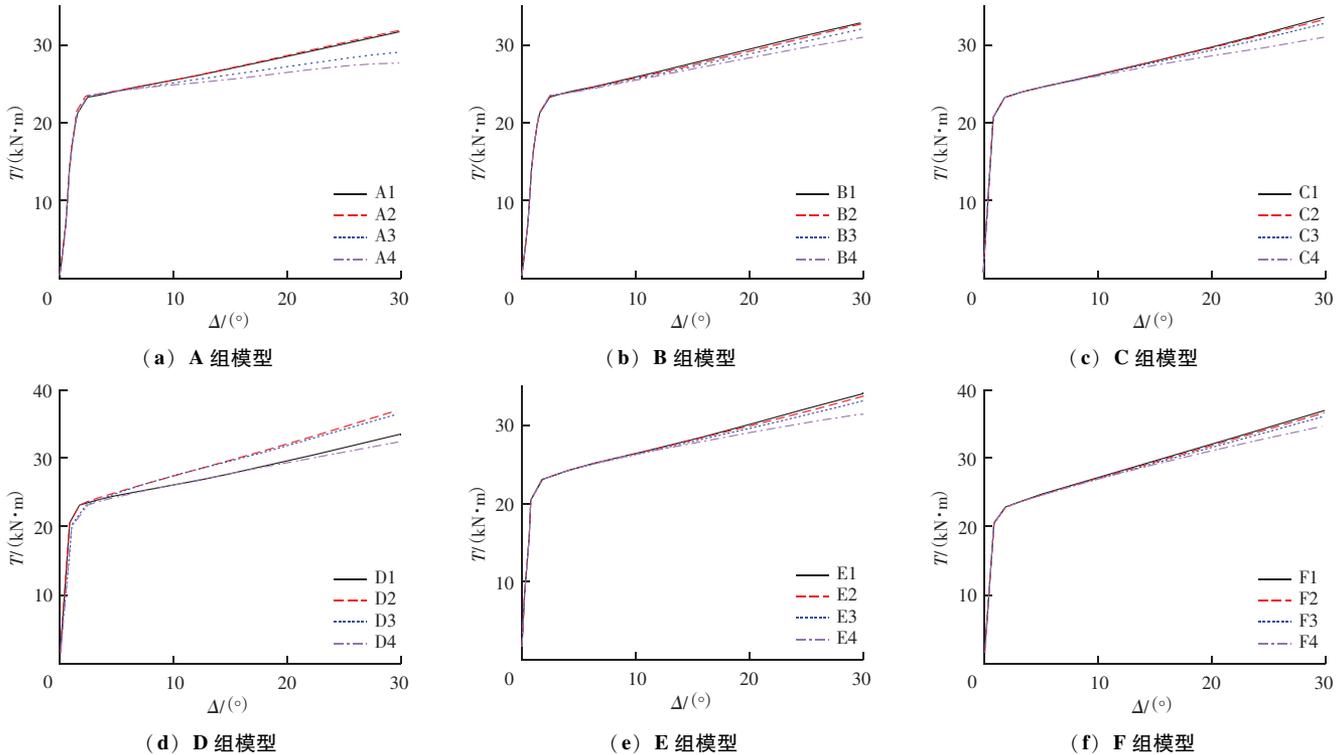


图5 轴压比影响下  $T-\theta$  对比图

Fig. 5  $T-\theta$  contrast diagram under the influence of axial compression ratio

与  $0.156 \text{ rad}$  ( $9^\circ$ ) 各往复加载 1 次,  $0.208 \text{ rad}$  ( $12^\circ$ )、 $0.26 \text{ rad}$  ( $15^\circ$ )、 $0.312 \text{ rad}$  ( $18^\circ$ )、 $0.364 \text{ rad}$  ( $21^\circ$ )、 $0.416 \text{ rad}$  ( $24^\circ$ )、 $0.468 \text{ rad}$  ( $27^\circ$ ) 与  $0.52 \text{ rad}$  ( $30^\circ$ ) 各往复加载 2 次的加载法, 加载制度如图 6 所示。

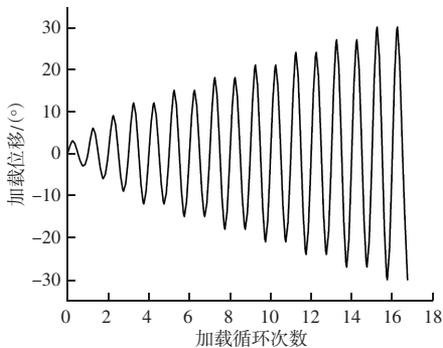


图6 加载制度

Fig. 6 Loading system

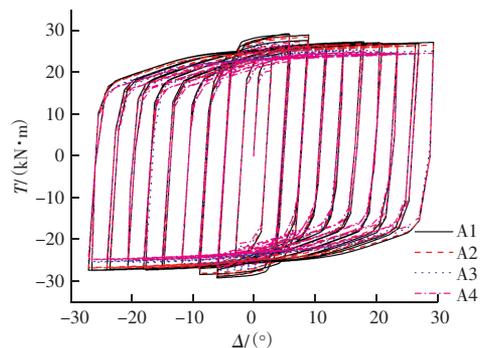
由图 7 可知, 在往复荷载作用下圆中空夹层钢管混凝土柱模型与圆多腔体中空夹层钢管混凝土柱模型都有较高的抗扭承载力。

(1) 圆中空夹层钢管混凝土柱模型 (A 组模型) 在往复荷载作用下, 轴压比增至 0.2 时抗扭承载力下降了 1.9%, 轴压比增至 0.6 时抗扭承载力下降

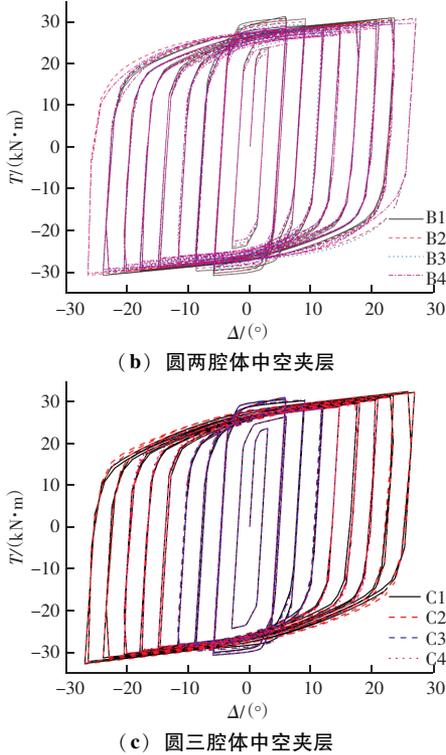
了 9.1% ;

(2) 圆两腔体中空夹层钢管混凝土柱模型 (B 组模型) 在轴压比增至 0.4 时, 模型的抗扭承载力仅下降了 1.7%, 模型在轴压比增至 0.6 时, 模型的抗扭承载力下降了 4.5% ;

(3) 圆三腔体中空夹层钢管混凝土柱模型 (C 组模型) 随轴压比增大模型的抗扭承载力出现先增后减的现象: 轴压比增至 0.2 时模型的抗扭承载力提高了 4.1%, 轴压比从 0 增大至 0.4 时模型的抗扭承载力降低了 3.4%, 轴压比增至 0.6 时, 模型的抗扭承载力降低了 4.3% 。



(a) 圆中空夹层

图7 往复荷载作用下  $T-\theta$  对比图Fig. 7  $T-\theta$  contrast diagram under reciprocating load

通过以上分析数据可知，圆多腔体中空夹层钢管混凝土柱模型随轴压比的增大，抗扭承载力降低并不明显，而圆中空夹层钢管混凝土柱模型在轴压比较小时抗扭承载力未出现显著变化，但是随轴压比的增大抗扭承载力出现较大降幅。主要是由于圆多腔体中空夹层钢管混凝土柱模型中，分腔板在往复荷载下对内、外钢管的拉结作用，有效缓解了钢管的环向变形。

通过图8圆中空夹层钢管混凝土柱模型中内外钢管与圆两腔、圆三腔体中空夹层钢管混凝土柱模型内外钢管相比，可知缺少分腔板约束支撑的圆中空夹层钢管混凝土柱模型在柱顶距离加载端40 mm处出现了较为明显的鼓曲变形，造成了圆中空夹层钢管混凝土柱模型后期抗扭承载力衰减。而圆两腔、圆三腔体中空夹层钢管混凝土柱模型的内外钢管因分腔板的连接有较为同频的变形，未出现局部较大屈曲。

图9是在轴压比0.4、圆中空夹层钢管混凝土柱模型与圆三腔体中空夹层钢管混凝土柱模型，内外钢管出现局部屈曲失效时，内填混凝土的有限元等效塑性应变PEEQ图。通过对比可知，圆三腔体中空

夹层钢管混凝土柱模型内外钢管与分腔板产生的环箍效应使内填混凝土等效塑性应变较为均衡发展，更有利于混凝土材料性能的充分发挥。

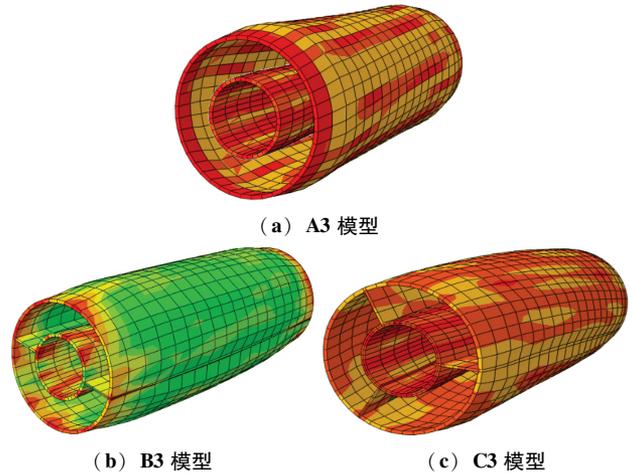


图8 内外钢管应力云图

Fig. 8 Stress nephogram of inner and outer steel pipe

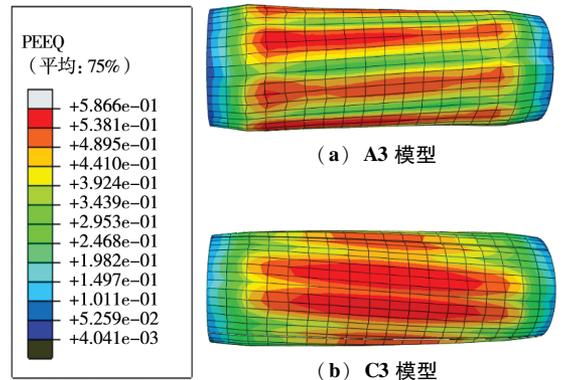


图9 混凝土有限元等效塑性应变云图

Fig. 9 Equivalent plastic strain nephogram of concrete

## 2.4 分腔板数量对抗扭承载力影响

图10对比了在轴压比0~0.6时分腔板数量对单向加载模型抗扭承载力的影响。在轴压比0.4~0.6时，圆两腔、三腔、五腔体中空夹层钢管混凝土柱模型较圆中空夹层钢管混凝土柱模型抗扭承载力都超过10%，呈现出趋势较为一致的增幅；在轴压比0~0.6时，圆六腔体中空夹层钢管混凝土柱模型较圆中空夹层钢管混凝土柱模型抗扭承载力都超过15%；在不同的轴压比时，圆多腔体中空夹层钢管混凝土柱模型较圆中空夹层钢管混凝土柱模型承载力都有提高，尤其在轴压比 $\geq 0.4$ 时设置分腔板的圆多腔体中空夹层钢管混凝土柱模型表现出较为突出的抗扭承载力。

## 建筑结构

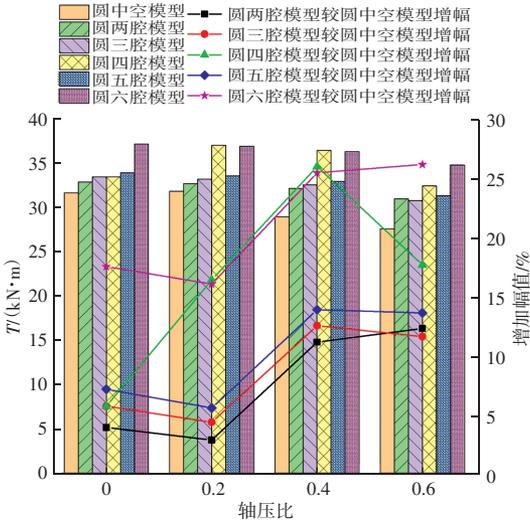


图 10 单向加载抗扭承载力对比图

Fig. 10 Contrast figure of torsional bearing capacity under unidirectional loading

由图 11 可知圆四腔体中空夹层钢管混凝土柱模型 (D 组模型) 与圆六腔体中空夹层钢管混凝土柱模型 (F 组模型) 抗扭承载力在图中形成了较为明显的拐点。在轴压比为 0.2 时, D 组模型较 C 组模型、E 组模型抗扭承载力分别提高了 11.5%、10.3%, F 组模型较 E 组模型抗扭承载力提高了 9.9%; 在轴压比为 0.4 时, D 组模型较 C 组模型、E 组模型抗扭承载力分别提高了 11.9%、10.6%, F 组模型较 E 组模型抗扭承载力提高了 10.2%; 在轴压比为 0.6 时, D 组模型较 C 组模型、E 组模型抗扭承载力分别提高了 5.4%、3.6%, F 组模型较 E 组模型抗扭承载力提高了 11.1%。由此可知圆四腔体中空钢管混凝土柱模型在轴压比较小时 (轴压比  $\leq 0.4$ ) 较其他腔体具有较好的抗扭承载力; 而圆六腔体中空钢管混凝土柱模型受到轴压比的影响较小, 比其他圆多腔体中空钢管混凝土柱模型具有较好的抗扭承载力及延性。

图 12 对比了在轴压比 0~0.6 时, 分腔板数量对往复加载模型抗扭承载力的影响。轴压比为 0、0.2、0.4、0.6 时, 圆两腔体中空夹层钢管混凝土柱模型 (B 组模型) 较圆中空夹层钢管混凝土柱模型 (A 组模型) 的抗扭承载力分别提高了 5.9%、6.9%、9.6%、11.1%; 圆三腔体中空夹层钢管混凝土柱模型 (C 组模型) 较圆中空夹层钢管混凝土柱模型 (A 组模型) 的抗扭承载力分别提高了 10.8%、17.6%、

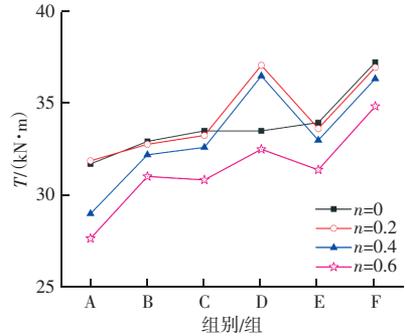


图 11 分腔板数量对抗扭承载力影响对比图

Fig. 11 Contrast diagram of effect of number of cavity plates on torsional bearing capacity

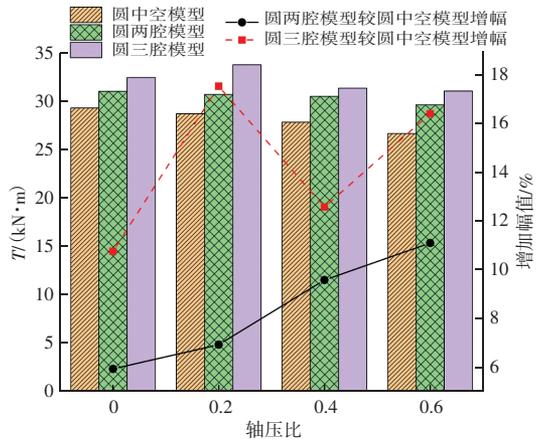


图 12 往复加载抗扭承载力对比图

Fig. 12 Contrast figure of torsional bearing capacity under reciprocating loading

12.6%、16.4%。主要原因是由于分腔板在圆中空夹层钢管混凝土柱模型中有效的拉结促使内外钢管具有较为一致的形变, 内外钢管与分腔板形成多个腔体时, 对核心混凝土的有效约束促使混凝土后期可以充分发挥作用, 4 个、6 个对称且成束的核心混凝土对内外钢管提供了强有力的侧向支撑, 避免了钢管较早出现屈曲, 钢管与混凝土的双向协同作用对构件承载力提高有积极的影响。

### 3 结论

通过对比圆中空夹层钢管混凝土柱试件在位移角控制的加载试验中与有限元建模分析中的变形形态与抗扭承载力, 确定了有限元建模分析的合理性后开展了圆多腔体中空夹层钢管混凝土柱模型在轴压比与截面形式 (多腔体数量) 影响下的抗扭承载力, 得到以下主要结论:

(1) 圆中空夹层钢管混凝土柱模型在单向加载

与往复加载中的抗扭承载力随轴压比的增加出现明显下降; 而圆多腔体中空夹层钢管混凝土柱模型由于分腔板的有效拉结, 使内外钢管协同作用且抑制混凝土开裂, 因此随轴压比的增加模型在单向加载与往复加载中的抗扭承载力下降缓慢。

(2) 单向加载中: 圆四腔体中空夹层钢管混凝土柱模型抗扭承载力随轴压比变化影响较小, 在轴压比 $\leq 0.4$ 时较其他多腔体中空夹层钢管混凝土柱模型具有显著的抗扭延性; 圆六腔体中空钢管混凝土柱模型在轴压比 $0 \sim 0.6$ 时, 比其他圆多腔体中空钢管混凝土柱模型具有更好的抗扭承载力及延性。

(3) 往复加载中: 圆两腔体、三腔体中空夹层钢管混凝土柱模型由于内外钢管与分腔板形成了较多套箍, 较圆中空夹层钢管混凝土柱模型抗扭承载力提高幅度较大。

## 参 考 文 献

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 陈志华, 杜颜胜, 吴辽. 矩形钢管混凝土结构研究综述 [J]. 建筑结构, 2015, 45 (16): 40-46.
- [3] 蔡绍怀, 焦占拴. 复式钢管混凝土柱的基本性能和承载力计算 [J]. 建筑结构学报, 1997, 18 (6): 20-25.
- [4] 曹万林, 徐萌萌, 董宏英, 等. 不同构造五边形钢管混凝土巨型柱轴压性能计算分析 [J]. 工程力学, 2015, 32 (6): 99-108, 123.
- [5] 曹万林, 郭瑞洁, 秦嘉, 等. 不同腔体构造方钢管高强再生混凝土轴压性能 [J]. 结构工程师, 2023, 39 (4): 104-115.
- [6] 王立长, 曹万林, 徐萌萌, 等. 五边形截面钢管混凝土巨型柱受压性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35 (1): 77-84.
- [7] 曹万林, 王浩, 殷飞, 等. 五边形截面型钢混凝土巨型柱轴压性能研究 [J]. 结构工程师, 2023, 39 (4): 90-103.
- [8] 张建伟, 胡建华, 乔崎云, 等. 不同构造措施对异形截面多腔体钢管混凝土柱的力学性能影响 [J]. 北京工业大学学报, 2015, 41 (8): 1172-1178.
- [9] 董宏英, 李瑞建, 曹万林, 等. 不同腔体构造矩形截面钢管混凝土柱轴压性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37 (5): 69-81.
- [10] 武海鹏, 曹万林, 董宏英, 等. 异形截面多腔钢管混凝土柱轴压承载力计算方法研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37 (9): 126-133.
- [11] 武海鹏, 曹万林, 董宏英. 基于“统一理论”的异形截面多腔钢管混凝土柱轴压承载力计算 [J]. 工程力学, 2019, 36 (8): 114-121.
- [12] 李斌, 邢新, 落凯妮. 多腔体方钢管混凝土短柱轴压力学性能研究 [J]. 建筑结构进展, 2021, 23 (1): 13-17, 24.
- [13] 徐礼华, 宋杨, 刘素梅, 等. 多腔式多边形钢管混凝土柱偏心受压承载力研究 [J]. 工程力学, 2019, 36 (4): 135-146.
- [14] 廖栩, 李吉人, 王庆利. 轴压荷载下中空夹层钢管混凝土抗扭性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (6): 90-96, 125.
- [15] 刘威, 韩林海. ABAQUS 分析钢管混凝土轴压性能的若干问题研究 [C]. 中国钢结构协会钢-混凝土组合结构分会第十次年会论文集, 2005: 166-169.

E - mail : fmhzhly@163.com