

# 圆中空钢管混凝土叠合构件纯弯性能研究

任庆新,魏秋宇,丁纪楠

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 对圆中空钢管混凝土叠合构件纯弯性能进行有限元分析,为该类构件设计提供计算依据。**方法** 首先利用已有试验验证模型的准确性;其次应用有限元软件 ABAQUS 对典型构件的弯矩-挠度曲线进行分析,定义4个特征点,研究不同特征点处试件的工作机理,分析不同参数对构件抗弯承载力的影响;最后应用叠加原理和极限平衡原理推导出圆中空钢管混凝土叠合构件纯弯承载力简化计算公式。**结果** 钢管直径由80 mm增加到100 mm、120 mm,即空心率由0.137增加到0.221、0.325时,承载力分别降低了5.2%和19.5%;建议的纯弯承载力简化公式计算结果与试验结果吻合良好。**结论** 圆中空钢管混凝土叠合构件在减轻自重的条件下具有较好的承载能力和延性,可以满足工程需要。

**关键词** 圆中空钢管混凝土叠合构件;纯弯性能;有限元模拟;工作机理;承载力计算

中图分类号 TU391

文献标志码 A

## Study on Circle Hollow Concrete-encased CFST Members Subject to Pure Bending

REN Qingxin, WEI Qiuyu, DING Ji'nan

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** Based on the experimental results, in order to provide calculation theory for the members, a finite element analysis (FEA) model to analyze the behavior of the circular hollow concrete-encased concrete filled steel tubular (CFST) members subject to pure bending is established by using the finite element software ABAQUS, which can analysis the moment-deflection curves of the members and the accuracy of the model is verified. Then, four characteristic points are defined to study the working mechanism of specimens, and the influence of different parameters on the flexural capacity of members is analyzed. Finally, the simulation of different parameters of the specimen is carried out. The results show the diameter of steel tube increases from 80 mm to 100 mm, 120 mm, that is, the hollow ratio increases from 0.137 to 0.211, 0.325, the bearing capacity decreases by 5.2% and 19.5%, respectively. Based on the

收稿日期:2020-10-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51678373);辽宁省"兴辽英才计划"项目(XLYC1902027);沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目(RC200144);辽宁省重点研发计划项目(2020JH2/10300110)

作者简介:任庆新(1978—),男,教授,博士,主要从事组合结构与混合结构等方面研究。

superposition principle and the limit equilibrium principle, the simplified formula of flexural capacity is proposed. The results show that the calculation results are in good agreement with the test ones, and can be used for the design and calculation of this kind of members. The circular hollow concrete-encased CFST members have good ductility and bearing capacity to meet the engineering needs.

**Key words:** circular hollow concrete-encased CFST member; pure bending performance; finite element simulation; working mechanism; bearing capacity calculation

中空钢管混凝土叠合构件是由钢筋混凝土包裹在空心钢管外而成的新型结构形式<sup>[1-3]</sup>。相比于钢筋混凝土构件,中空钢管混凝土叠合构件由于中心被空心钢管取代,从而具有截面易开展、抗弯刚度大、自重轻等优点,适用于桥梁结构中的桥墩、高层建筑中的大直径柱、各种支架柱以及送变电杆塔等结构,具有广泛应用前景。

A. Abouzied<sup>[4]</sup>研究了矩形中空 GFRP 混凝土叠合构件纯弯性能;Q. Giuseppe<sup>[5]</sup>对圆中空钢筋混凝土构件压-弯作用下的承载力进行了计算及简化;梁荟<sup>[6]</sup>研究了方中空钢管混凝土叠合构件纯弯性能,J. Y. Chen<sup>[7]</sup>研究了箱型中空钢管混凝土叠合构件的纯弯性能;刘清等<sup>[8]</sup>对圆中空夹层钢管自密实混凝土抗弯性能进行了试验研究。

目前对中空钢管混凝土叠合构件的研究尚处于起步阶段。基于此,笔者建立了圆中空钢管混凝土叠合构件纯弯有限元模型,并在试验验证基础上,利用有限元软件 ABAQUS 对典型算例受力全过程工作机理以及不同参数对承载力的影响进行分析,研究内钢管直径与混凝土强度对试件受力性能的影响,并以叠加理论和极限平衡理论为基础提出了构件在纯弯作用下的抗弯承载力简化计算公式。

## 1 有限元模型

### 1.1 模型参数

笔者以试件 CB1 建立有限元模型,构件长  $L=2\,000\text{ mm}$ ,截面直径  $D=200\text{ mm}$ ;钢材选用 Q345B,钢材屈服强度  $f_{ys}=378\text{ MPa}$ ,

钢管外径  $d=80\text{ mm}$ ,钢管壁厚  $t=2.76\text{ mm}$ ;纵筋采用  $\Phi 12\text{ HRB400}$  螺纹钢筋,纵筋屈服强度  $f_{yz}=384\text{ MPa}$ ,箍筋为  $\Phi 6.5\text{ HPB300}$  光圆钢筋,箍筋屈服强度  $f_{yg}=326\text{ MPa}$ ;箍筋间距为  $100\text{ mm}$ ;选用 C40 混凝土,混凝土立方体抗压强度  $f_{cu}=45.2\text{ MPa}$ ,保护层厚度  $25\text{ mm}$ 。试件设计如图 1 所示,试件参数见表 1。

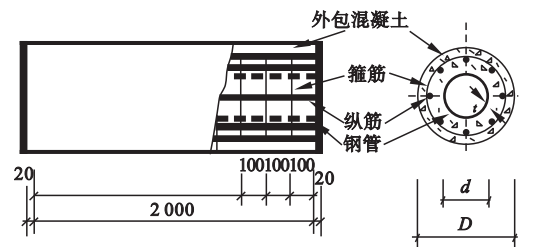


图 1 试件截面

Fig. 1 Cross-section of specimens

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

编号	$D \times H /$ mm	$d \times t /$ mm	空心率 %	内置钢管
CB1-1	$200 \times 2\,000$	$80 \times 2.78$	0.138	是
CB1-2	$200 \times 2\,000$	$80 \times 2.78$	0.138	是
CB2-1	$200 \times 2\,000$	$100 \times 2.78$	0.223	是
CB2-2	$200 \times 2\,000$	$100 \times 2.78$	0.223	是
CB3-1	$200 \times 2\,000$	—	0.138	否
CB3-2	$200 \times 2\,000$	—	0.138	否

### 1.2 材料本构关系

混凝土本构关系分为无约束混凝土和箍筋约束混凝土两部分,无约束部分选用过镇海<sup>[9]</sup>提出的无约束混凝土本构模型,箍筋约束部分采用 L. H. Han<sup>[10]</sup>提出的应力-应变关系模型,钢筋本构关系采用双折线应力-

应变关系,钢管的本构关系采用五段式<sup>[11]</sup>本构模型。

1.3 模型建立

1.3.1 单元类型选取

钢管采用四节点减缩积分格式的壳单元(S4R)来模拟,在壳单元厚度上采用九个积分点的 Simpson 积分。纵筋和箍筋采用二节点三维线性桁架单元(T3D2),组合成钢筋骨架内嵌于混凝土中。混凝土采用八节点六面体线性减缩积三维实体单元(C3D8R)。有限元模型见图2。

1.3.2 边界条件、界面接触及加载方式

为简化模型的建立,加载及支座位置设置刚性垫块,左侧垫块模拟固定铰支座,限制X、Y、Z方向的位移,右侧垫块模拟滚动铰支座,限制X、Y方向的位移。通过设置参考点Y方向的位移进行位移加载<sup>[12]</sup>。钢管与端板之间采用壳固耦合的接触方式。混凝土与端板、刚性垫块之间采用tie约束。混凝土与钢管之间:法线方向采用“硬”接触,切线方向的粘结滑移采用“罚”函数,摩擦系数取0.6<sup>[13]</sup>。

1.4 试验验证

笔者对试验构件CB1、CB2和CB3建立力学模型,并用试验结果验证。3个试件破坏模态见图3,不同参数下弯矩-挠度( $M-u_m$ )曲线见图4,承载力对比如图5所示。由图3可知,模拟结果与试验结果吻合较好。由图4可知,有限元模拟得到的 $M-u_m$ 曲线与试验实测结果基本一致,且初始阶段刚度大致相等,验证了有限元模型的准确性。由图5得到弯矩试验值与有限元模拟值的比值平均值为0.939,标准差为0.042,上述对比结果服从正态规律分布, $M_{ue}/M_{uFEM}$ 达到置信水平95%时的置信区间为(0.895,0.982)。

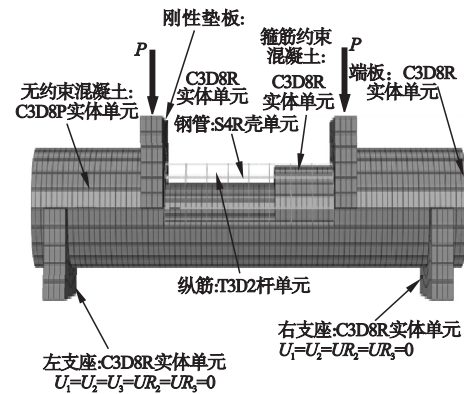


图2 有限元模型

Fig.2 Finite element analysis model

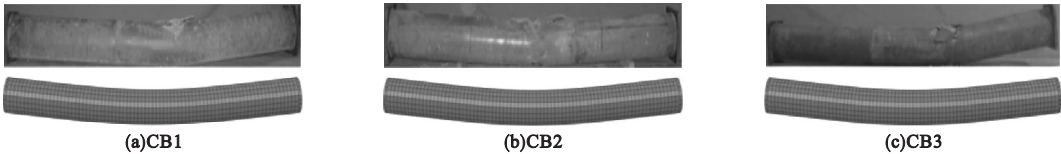


图3 试件破坏模态

Fig.3 Failure modes of specimens

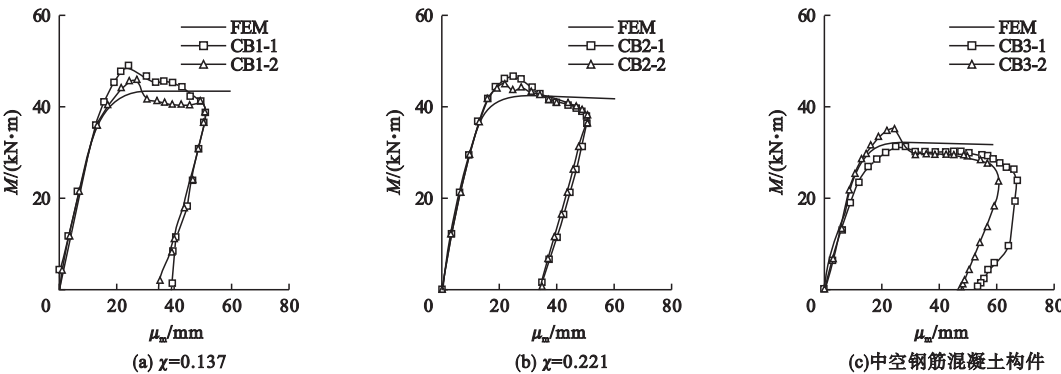


图4 M-um 曲线

Fig.4 Curves of  $M-u_m$

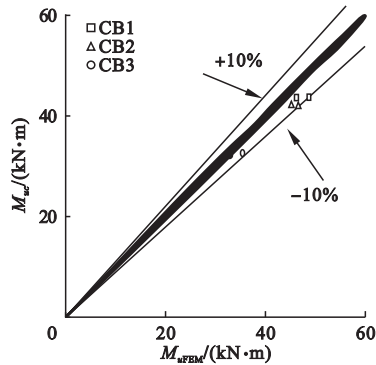


图 5 承载力对比

Fig. 5 Comparison between FEM and test results

2 工作机理分析

笔者将试件 CB1 作为典型算例进行分析纯弯工作机理。CB1 的弯矩 - 挠度曲线特征点如图 6 所示,定义 4 个特征点。A 点:受拉区混凝土发生塑性变形至开裂; B 点:受拉区纵筋出现屈服; C 点:试件达到峰值弯矩即抗弯承载力; D 点:弯矩值下降到极限弯矩的 85%。由此可以将圆中空钢管混凝土叠合构件受力全过程分为 4 个阶段:弹性阶段 I、弹性阶段 II、弹塑性阶段以及下降阶段。

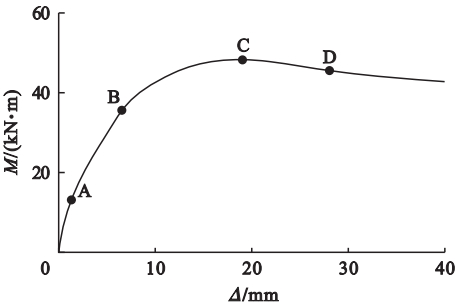


图 6 特征点示意图

Fig. 6 Schematic diagram of feature points

不同特征点处跨中混凝土应力分布如图 7 示,图中虚线为中性轴。A 点为弹性阶段 I 和弹性阶段 II 分界点,混凝土受拉区边缘处拉应力增加至开裂应力,构件开始出现裂缝。B 点为弹性阶段 II 和弹塑性阶段分界点,此时构件混凝土已经出现多条明显裂缝,中性轴位置明显上移,构件的竖向变急速增大,达到极限拉应力的混凝土单元变多,受拉

区面积不断增大,纵筋屈服进入塑性变形阶段。C 点处,试件达到峰值弯矩,构件的竖向变形继续增加,混凝土中性轴继续上移,钢筋受拉区大部分达到屈服强度,钢管进入塑性变形阶段,受压侧混凝土被压碎。D 点处,弯矩降降至峰值弯矩的 85%,受压侧混凝土压碎区域增大,竖向挠度变化明显,受拉区混凝土裂缝达到 2 mm 左右。

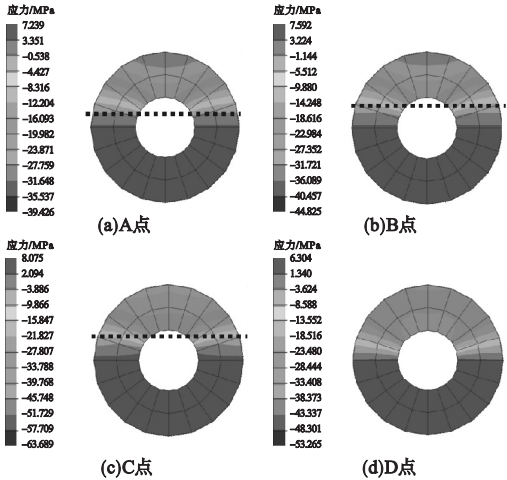


图 7 特征点跨中混凝土应力分布

Fig. 7 Stress distribution of middle span concrete

图 8 为构件跨中最低点处钢管与混凝土相互作用下应力 - 位移 ( $P - u_m$ ) 曲线。从图中可以看出,构件处于弹性阶段时,钢管的泊松比大于混凝土,钢管与混凝土之间存在接触应力;随着加载的持续进行,受拉区混凝土进入塑性阶段,混凝土逐渐开裂,接触应力减小,钢管达到屈曲时钢管与混凝土脱离,接触应力先增大后减小。

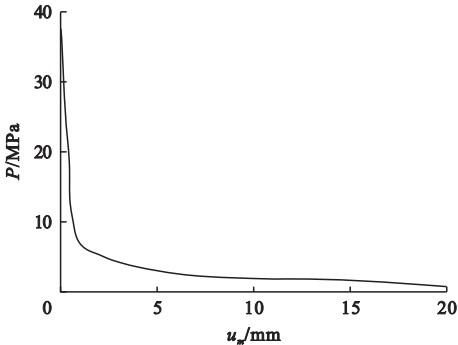


图 8  $P - u_m$  曲线

Fig. 8  $P - u_m$  curve of mid-section

3 参数分析

笔者分别选取钢管强度 $f_{ys}$ 、钢管直径 $d$ 、钢管厚度 $t$ 、混凝土强度 $f_{cu}$ 、纵筋强度 $f_{yz}$ 和箍筋间距 $s$ 共6个参数对构件承载力进行分析。不同参数对构件弯矩-挠度曲线( $M-\Delta$ )的影响见图9~图14。

3.1 钢管直径

不同钢管直径下构件弯矩-挠度曲线如图9所示。从图中可以得出,当钢管直径由80 mm增加至100 mm、120 mm时,弯矩由44.59 kN·m减小到43.42 kN·m、35.99 kN·m,分别减小了4.8%和19.3%。当钢管直径由80 mm增加到100 mm时,刚度由2.76 (kN·m)/mm减少至2.64(kN·m)/mm,减少了4.3%,直径由80 mm增加到120 mm时,刚度从2.76(kN·m)/mm增加到2.85(kN·m)/mm,增加了3.2%。可见,钢管直径对承载力影响显著,对刚度影响不明显。

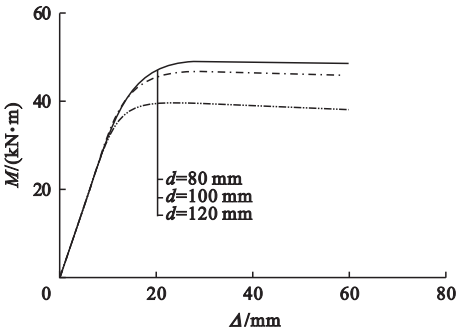


图9 不同钢管直径下弯矩-挠度曲线  
Fig.9 Influence of  $d$  on  $M-\Delta$  curves

3.2 钢管厚度

不同钢管厚度下构件弯矩-挠度曲线如图10所示。从图中可以得出,当钢管厚度由3.0 mm减小到2.2 mm时,弯矩由44.59 kN·m减小到43.42 kN·m,减小了2.6%;钢管厚度由3.0 mm增加到3.6 mm时,弯矩 $M$ 由44.59 kN·m增加到45.25 kN·m,增大了1.5%。钢管厚度由3.0 mm减小到2.2 mm时,刚度由

2.76(kN·m)/mm增加到2.79(kN·m)/mm,增加了1.1%;厚度由3.0 mm增加到3.6 mm时,刚度由2.76(kN·m)/mm增加到2.78(kN·m)/mm,增加了0.7%。可见,钢管厚度对承载力有较大影响,对刚度无明显影响。

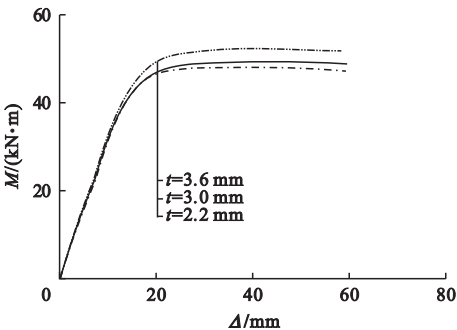


图10 不同钢管厚度下弯矩-挠度曲线  
Fig.10 Influence of  $t$  on  $M-\Delta$  curves

3.3 混凝土强度

不同混凝土强度下构件弯矩-挠度曲线如图11所示。从图中可以得出,混凝土强度由40 MPa增加至60 MPa、80 MPa时,弯矩由44.59 kN·m增加到47.57 kN·m、50.68 kN·m,分别增加了6.7%和13.7%。当混凝土强度由40 MPa增加到60 MPa、80 MPa时,刚度由2.76(kN·m)/mm增加到2.87(kN·m)/mm、3.04(kN·m)/mm,分别增加了4.0%、10.1%。可见,混凝土强度对承载力及刚度影响显著。

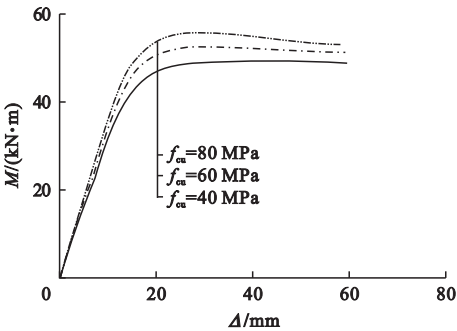


图11 不同混凝土强度下弯矩-挠度曲线  
Fig.11 Influence of  $f_{cu}$  on  $M-\Delta$  curves

3.4 钢材强度

不同钢材强度下构件弯矩-挠度曲线如图12所示。从图中可以得出,当钢材强度由345 MPa增加到390 MPa、420 MPa时,弯矩



由  $44.59\text{ kN}\cdot\text{m}$  增加到  $44.89\text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $46.14\text{ kN}\cdot\text{m}$ , 分别减小了  $0.7\%$  和  $3.5\%$ 。当钢材强度由  $345\text{ MPa}$  增加到  $390\text{ MPa}$ 、 $420\text{ MPa}$  时, 刚度由  $2.76\text{ (kN}\cdot\text{m)/mm}$  增加到  $3.41\text{ (kN}\cdot\text{m)/mm}$ 、 $3.42\text{ (kN}\cdot\text{m)/mm}$ , 分别增加了  $23.6\%$ 、 $23.9\%$ 。可见, 钢材强度对承载力影响不明显, 对刚度影响显著。

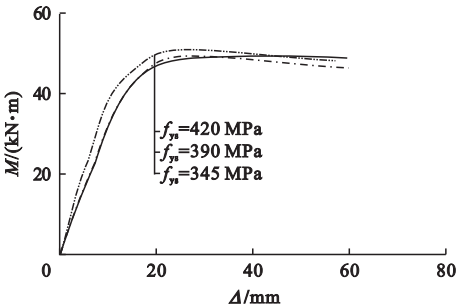


图 12 不同钢材强度下弯矩 - 挠度曲线  
Fig. 12 Influence of  $f_y$  on  $M-\Delta$  curves

3.5 纵筋强度

不同钢管直径下构件弯矩 - 挠度曲线如图 13 所示。从图中可以得出, 当纵筋强度由  $400\text{ MPa}$  减小到  $335\text{ MPa}$  时, 弯矩由  $44.59\text{ kN}\cdot\text{m}$  减小到  $43.86\text{ kN}\cdot\text{m}$ , 减小了  $1.6\%$ ; 强度由  $400\text{ MPa}$  增加到  $500\text{ MPa}$  时, 弯矩由  $44.59\text{ kN}\cdot\text{m}$  增加到  $50.82\text{ kN}\cdot\text{m}$ , 增加了  $14\%$ 。当纵筋强度由  $400\text{ MPa}$  减小到  $335\text{ MPa}$  时, 刚度由  $2.76\text{ (kN}\cdot\text{m)/mm}$  增加到  $3.48\text{ (kN}\cdot\text{m)/mm}$ , 减少了  $26.1\%$ ; 纵筋强度由  $400\text{ MPa}$  增加到  $500\text{ MPa}$  时, 刚度由  $2.76\text{ (kN}\cdot\text{m)/mm}$  增加到  $3.67\text{ (kN}\cdot\text{m)/mm}$ , 增加了  $33.0\%$ 。可见, 纵筋强度对承载力影响以及刚度影响显著。

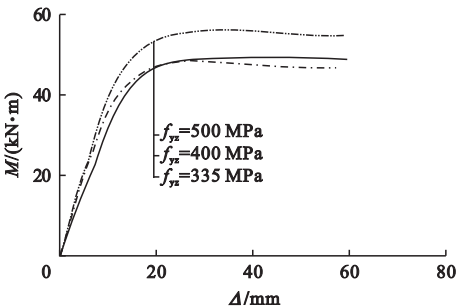


图 13 不同纵筋强度下弯矩 - 挠度曲线  
Fig. 13 Influence of  $f_{yz}$  on  $M-\Delta$  curves

3.6 箍筋间距

不同箍筋间距下构件弯矩 - 挠度曲线如图 14 所示。从图中可以得出, 箍筋间距由  $80\text{ mm}$  增加到  $100\text{ mm}$ 、 $125\text{ mm}$  时, 弯矩由  $44.59\text{ kN}\cdot\text{m}$  增加到  $44.60\text{ kN}\cdot\text{m}$ 、 $44.70\text{ kN}\cdot\text{m}$ , 分别增加  $0.02\%$  和  $0.25\%$ 。当箍筋间距由  $80\text{ mm}$  增加到  $100\text{ mm}$ 、 $125\text{ mm}$  时, 刚度由  $2.76\text{ (kN}\cdot\text{m)/mm}$  减小到  $2.75\text{ (kN}\cdot\text{m)/mm}$ 、 $2.65\text{ (kN}\cdot\text{m)/mm}$ , 分别减小  $0.4\%$  和  $4.0\%$ 。可见, 箍筋间距对承载力以及刚度无显著影响。

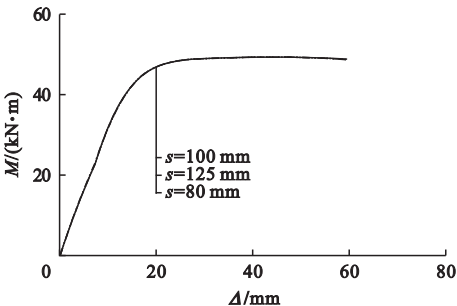


图 14 不同箍筋间距下弯矩 - 挠度曲线  
Fig. 14 Influence of  $s$  on  $M-\Delta$  curves

由此可以得出对圆中空钢管混凝土叠合构件抗弯承载力影响较大的参数依次是钢管直径、混凝土强度、纵筋强度、钢管厚度。对刚度影响较大的参数依次是混凝土强度、钢材强度以及纵筋强度。

4 纯弯承载力公式

基于叠加原理和极限平衡原理, 可以将圆中空钢管混凝土叠合构件的抗弯承载力分为钢管和钢筋混凝土两部分。为了方便计算钢筋混凝土部分的弯矩, 可以将圆空心钢筋混凝土截面等效为类“工”型截面, 等效截面如图 15 所示。

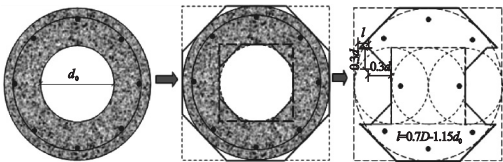


图 15 外包钢筋混凝土等效截面

Fig. 15 Cross-section simplification

根据文献[14-15],钢管部分的弯矩 $M_s$ 计算见式(1),钢筋混凝土部分正截面纯弯承载力 $M_{RC}$ 计算见式(2):

$$M_s = kf_{ys}A_s d. \tag{1}$$

$$M_{RC} = \alpha_1 \cdot f_c \cdot A_e \cdot \left(\frac{D}{2} - x_c\right) + \sum \sigma_{li} \cdot A_{li} \left(\frac{D}{2} - x_{li}\right). \tag{2}$$

式中: $A_e$ 为混凝土等效应力块面积; $A_{li}$ 为单根钢筋面积; $x_c$ 为混凝土等效应力块形心到受压边缘高度; $x_{li}$ 为纵筋到受压边缘高度; $\sigma_{li}$ 为纵筋到应力。

运用线性回归计算得到 $m_1 = 2.522\ 7$ 、 $m_2 = 2.522\ 7$ 、 $m_3 = 1.581$ ,代入式(1)得:  
 $k = 2.522\ 7(d/D)^2 - 3.714(d/D) + 1.581$ 。

应用叠加原理将式(1)与式(2)两部分的弯矩值叠加可以得到圆中空钢管混凝土叠合构件抗弯承载力计算式:

$$M_u = M_s + M_{RC}. \tag{3}$$

试验试件CB1~CB3的承载力公式计算值 $M_{uc}$ 与试验值 $M_{ue}$ 结果见表2。由表2可以得出, $M_{uc}/M_{ue}$ 的平均值和均方差分别为0.995和0.115,对比结果如图16所示。从图中可以看出,对比结果服从正态规律分布, $M_{uc}/M_{uFEM}$ 达到置信水平95%时的置信区间为(0.875,1.117)。

表2 试验计算结果

Table 2 Calculation results of test specimens						
试验编号	$M_{ue}/(\text{kN}\cdot\text{m})$		$M_{uc}/(\text{kN}\cdot\text{m})$		$M_{uc}/M_{ue}$	
	试验值	平均值	FEM	公式	FEM	公式
CB1-1	48.758	47.4	43.6	44.6	0.895	0.914
CB1-2	46.022				0.943	0.948
CB2-1	46.906	46.1	42.3	43.4	0.903	0.926
CB2-2	45.221				0.941	0.960
CB3-1	32.294	33.7	32.7	30.8	1.013	0.954
CB3-2	35.116				0.931	0.877

注: $M_{ue}$ 为试验测得弯矩值, $M_{uc}$ 为公式计算值。

因为试验数据有限,笔者通过有限元软件变换不同参数验证上述公式的准确性。承载力计算值 $M_{uc}$ 与有限元模拟值 $M_{uFME}$ 结果见表3。从表3可以得出, $M_{uc}/M_{uFEM}$ 的平均

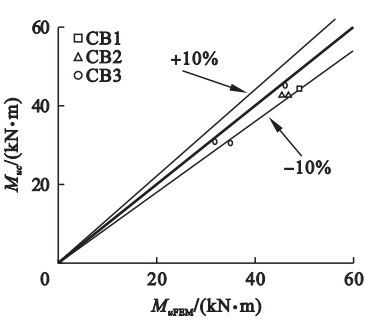


图16 公式计算值与试验值对比

Fig. 16 Comparison of formula with experimental values

值和均方差分别为0.993和0.050,对比结果如图17所示。从图中可以看出,对比结果服从正态规律分布, $M_{uc}/M_{uFEM}$ 达到置信水平95%时的置信区间为(0.964,1.036),因此公式可以满足实际工程。

表3 模拟计算结果

Table 3 Calculation results of FEM specimens			
试件编号	$M_{uFEM}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{uc}/(\text{kN}\cdot\text{m})$	$M_{uc2}/M_{uFEM}$
0	44.59	44.03	0.988
1-1	43.42	42.26	0.973
1-2	35.99	35.99	1.000
2-1	43.42	40.57	0.934
2-2	45.25	51.79	1.096
3-1	47.57	48.60	1.022
3-2	50.68	51.58	1.018
4-1	44.89	48.72	1.085
4-2	46.14	50.84	1.102
5-1	43.86	44.94	1.025
5-2	50.83	48.82	0.961
6-1	44.60	45.52	1.018
6-2	47.70	45.52	1.016

注: $M_{uFEM}$ 为有限元模拟值, $M_{uc}$ 为公式计算值。

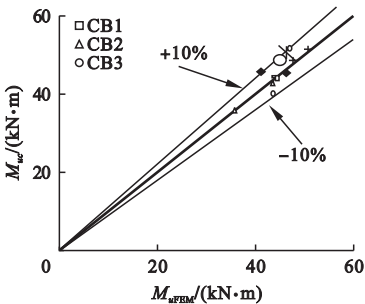


图17 公式计算值与模拟值对比

Fig. 17 Comparison of formula with FEM values

# 5 结 论

(1)应用有限元软件模拟计算得到圆中空钢管混凝土叠合构件的弯矩-挠度曲线,有限元计算结果与试验实测结果偏差平均值为6.2%,结果吻合良好,有限元模型正确。

(2)圆中空钢管混凝土叠合构件纯弯破坏模态与钢筋混凝土构件的纯弯破坏模态基本相同,受压区混凝土压碎,受拉区钢筋、钢管屈服为构件的界限破坏准则,截面应变符合平截面假定。

(3)钢管直径每增加25%,抗弯承载力平均减小4.8%,刚度无明显变化;混凝土强度每增加35.6%,抗弯承载力平均增大7.9%,刚度平均增大5.0%;纵筋强度每增加22.2%,抗弯承载力平均增大7.8%,刚度平均增大13%;钢管厚度每增加50%,抗弯承载力平均减小2.1%,刚度无明显变化。

(4)笔者推导出圆中空钢管混凝土叠合构件纯弯承载力计算公式,公式计算值与试验值结果吻合较好,可应用于实际工程。

## 参考文献

- [1] AN Y F, HAN L H, Roeder C. Flexural performance of concrete-encased concrete filled steel tubes[J]. Magazine of concrete research, 2013, 65(1): 1-19.
- [2] WANG R, Han L H, Nie J G, et al. Flexural performance of rectangular CFST members[J]. Thin-walled structures, 2014, 79: 154-165.
- [3] HAN L H, Xu W, He SH, et al. Flexural behaviour of concrete filled steel tubular (CFST) chord to hollowtubular brace truss: experiments[J]. Journal of constructional steel research, 2015, 109: 137-151.
- [4] ABOUZIED A, MASMOUDI R. Structural performance of new fully and partially concrete-filled rectangular FRP-tube beams[J]. Construction and building materials, 2015, 101: 652-660.
- [5] GIUSEPPE Q, FRANCESCO T, GIUSEPPE C M. Closed-form approximation of the axial force-bending moment interaction diagram for hollow circular reinforced concrete cross-sections[J]. Engineering structures, 2017, 153: 516-524.
- [6] 梁荟. 方中空钢管混凝土叠合构件纯弯性能研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.

- (LIANG Hui. Study on pure bending behavior of square hollow concrete-encased CFST members [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
- [7] CHEN J Y, WANG F C, HAN L H, et al. Flexural performance of concrete-encased CFST box members [J]. Structures, 2020, 27: 2034-2047.
- [8] 刘清, 张栋, 陈波. 圆中空夹层钢管自密实混凝土抗弯承载力试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(增刊1): 213-216.  
(LIU Qing, ZHANG Dong, CHEN Bo. Pure bending of self-compacting concrete-filled double skin steel tubes [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(S1): 213-216.)
- [9] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
(GUO Zhenghai, SHI Xudong. Principle and analysis of reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [10] HAN L H, AN Y F. Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression[J]. Journal of constructional steel research, 2014, 93: 62-76.
- [11] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
(HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures-theory and practice [M]. Beijing: Science Press, 2016.)
- [12] 任庆新, 丁纪楠, 李明伦, 等. 中空钢管混凝土叠合柱偏压力学性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(1): 35-42.  
(REN Qingxin, DING Jinan, LI Minglun, et al. Research on mechanical properties of hollow concrete-encased concrete filled steel tube under eccentric compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(1): 35-42.)
- [13] 杨志坚, 韩嘉明, 杨军彩, 等. 空心圆钢管混凝土轴压短柱有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(3): 429-438.  
(YANG Zhijian, HAN Jiaming, YANG Juncui, et al. Finite element analysis of hollow circular concrete filled steel tubular short columns under axial compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(3): 429-438.)
- [14] 清华大学. 钢管混凝土叠合柱结构技术规程: CECS188:2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.  
(Tsinghua University. Technical specification for steel tube-reinforced concrete column structure: T/CECS188: 2019 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2020.)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.  
(Ministry of Housing and Urban Rural Development of the RPC. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.)  
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)