

# 方中空夹层钢管混凝土叠合构件 纯扭性能研究

任庆新<sup>1,2</sup>, 蔡雨晨<sup>1,3</sup>, 王庆贺<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 佛山大学交通与土木建筑学院,  
广东 佛山 528225; 3. 山东华宇工学院能源与建筑工程学院, 山东 德州 253034)

**摘要** 目的 研究方中空夹层钢管混凝土叠合构件的纯扭性能, 提出抗扭承载力计算公式。方法 运用 ABAQUS 有限元分析软件建立方中空夹层钢管混凝土叠合构件有限元模型, 分析其受扭工作机理和影响构件承载力的重要参数, 最后通过叠加法得出抗扭承载力计算公式。结果 受力全过程可分为弹性阶段、弹塑性阶段、塑性阶段; 在弹性阶段, 各部件之间协同作用, 产生相互作用力, 但相对较小; 在弹塑性阶段, 外部混凝土与钢管分离, 无相互作用力产生; 通过分析构件在纯扭作用下的工作机理, 确定了外钢管强度、直径及径厚比是影响构件抗扭承载力的重要参数; 通过叠加法得出的纯扭公式计算值与有限元模拟值偏差在 10% 以内, 公式相对可靠。结论 方中空夹层钢管混凝土叠合构件具有良好的抗扭性能, 笔者基于叠加原理提出的纯扭公式可精确地计算其抗扭承载力。

**关键词** 方中空夹层钢管混凝土叠合构件; 纯扭; 有限元分析; 工作机理

中图分类号 TU398.1

文献标志码 A

**引用格式:**任庆新, 蔡雨晨, 王庆贺. 方中空夹层钢管混凝土叠合构件纯扭性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(6): 984-993. (REN Qingxin, Cai Yuchen, WANG Qinghe. Behavior of square concrete-encased CFDST members under pure torsion[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(6): 984-993.)

## Behavior of Square Concrete-encased CFDST Members under Pure Torsion

REN Qingxin<sup>1,2</sup>, CAI Yuchen<sup>1,3</sup>, WANG Qinghe<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering and Transportation, Foshan University, Foshan, China, 528225; 3. School of Energy and Architectural Engineering, Shandong Huayu University of Technology, Dezhou, China, 253034)

**Abstract:** To study the behavior of square concrete-encased CFDST members under pure torsion, a

收稿日期: 2022-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808351); 沈阳市科学技术计划项目(21-108-9-34)

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。

calculation formula for torsional bearing capacity was proposed. The ABAQUS was used to establish the model of square concrete-encased CFDST members, the working mechanism of the members under pure torsion and the important parameters affecting the bearing capacity of the members were analyzed. Finally, the pure torsion calculation formula was proposed by the superposition method. The whole process of stress can be divided into three stages: elastic stage, elastoplastic stage, plastic stage. In the elastic stage, the members were subjected to synergistic force, and an interaction force was generated, but it was relatively small. In the elastoplastic stage, the outer concrete was separated from the steel tube and no interaction occurs. The working mechanism of members under pure torsion was analyzed, and the outer steel tube's strength, diameter and diameter thickness ratio were important parameters affecting the torsional bearing capacity of the members. The deviation between the calculated value of the pure torque formula obtained by the superposition method and the simulated value of the finite element was within basically 10%, and the formula was relatively reliable. The square concrete-encased CFDST members have good torsional bearing behavior, and the pure torsional formula proposed in this paper based on the superposition principle can better calculate its torsional bearing capacity.

**Key words:** square concrete-encased CFDST members; pure torsion; finite element analysis; working mechanism

方中空夹层钢管混凝土叠合构件是由中空夹层钢管混凝土替换钢管混凝土叠合构件中的钢管混凝土衍生而来的,此类构件具有承载力高、耐火性能好等优点,在工业厂房、桥梁结构、送变电塔、高层建筑及车站站台等工程中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。实际工程中,构件在荷载作用下多以压扭、压弯扭甚至压弯剪扭等组合形式出现,纯扭是研究构件在复杂受力下的基础,因此有必要对构件纯扭性能进行研究。

众多学者通过试验和有限元模拟对中空夹层钢管混凝土构件和钢管混凝土叠合构件进行了研究。任庆新等<sup>[2]</sup>通过对钢管混凝土叠合构件的压扭试验,提出了钢管混凝土叠合构件抗扭承载力计算公式;S. Li 等<sup>[3]</sup>通过有限元模拟对钢管混凝土叠合构件的压扭性能进行全过程分析,研究了不同参数对抗扭承载力的影响;H. Huang 等<sup>[4]</sup>通过试验和有限元模拟对中空夹层钢管混凝土构件纯扭性能进行研究,分析典型破坏模式及各部件之间的相互作用,并提出了抗扭承载力计算公式;G. B. Lu 等<sup>[5]</sup>通过有限元模拟研究中空夹层钢管混凝土构件纯扭性能,分析了不

同参数对其抗扭能力的影响;Y. H. Wang 等<sup>[6]</sup>通过试验研究了在往复作用下中空夹层钢管混凝土构件纯扭性能,验证了构件具有良好的耗能能力;R. Deng 等<sup>[7]</sup>对锥形中空夹层钢管混凝土构件纯扭性能进行试验研究,得出了典型失效模式,并提出了一种简化抗扭承载力计算公式。

综上所述,笔者通过 ABAQUS 有限元分析软件建立方中空夹层钢管混凝土叠合构件有限元模型,通过扭矩-转角曲线、破坏模式及相互作用力分析构件纯扭受力状态,研究不同参数对构件力学性能的影响,进而采用叠加法提出构件抗扭承载力计算公式;研究表明:方中空夹层钢管混凝土叠合构件具有良好的延性和抗扭性能,笔者基于叠加原理提出的纯扭公式可精确地计算其抗扭承载力。

# 1 有限元模拟及验证

## 1.1 单元类型和划分

混凝土和端板采用 C3D8R 单元,内、外钢管采用 S4R 单元,箍筋和纵筋采用 T3D2 单元。采用结构化网格技术,网格全局尺寸选择 15。有限元模型如图 1 所示。

耦合,使各部件能在扭转过程中保持一致。箍筋与纵筋组成钢筋笼,内置于外部混凝土中。钢管与混凝土采用面与面接触,具体参考文献[3]。

1.4 边界条件

为了便于对构件施加荷载,在两个端板的中心分别设置参考点,参考点与端板表面采用 Couple 耦合,模型一端完全固定,一端施加反作用力矩。

1.5 模型验证

目前,尚未有关于方中空夹层钢管混凝土叠合构件纯扭试验的相关数据,因此笔者对照文献[2]中方钢管混凝土叠合构件和文献[12]中圆中空夹层钢管混凝土构件的纯扭试验,建立二者的有限元模型,具体参数如表1所示。对照二者有限元模拟与其纯扭试验得出的扭矩-转角曲线,对比情况如图2所示。扭矩的试验值 $T_{uc}$ 和有限元模拟值 $T_{uc}$ 之比的平均值为0.957,方差为0.026,可见吻合较好,由此验证了上述建模方法的准确性,所以此种建模方法可以用来研究方中空夹层钢管混凝土叠合构件的纯扭力学性能。

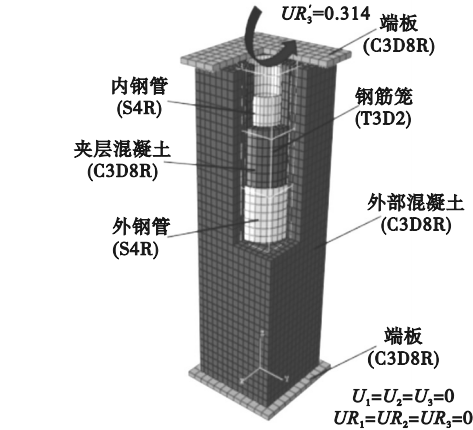


图1 有限元模型

Fig.1 The finite element model

1.2 材料本构关系模型

夹层混凝土采用韩林海<sup>[8]</sup>提出的模型,箍筋约束混凝土采用 L. H. Han 等<sup>[9]</sup>提出的模型,无约束混凝土采用 M. M. Attard 等<sup>[10]</sup>提出的模型。钢管采用 L. H. Han 等<sup>[9]</sup>提出的五段式模型,箍筋和纵筋采用 X. M. Zhao 等<sup>[11]</sup>提出的二段式模型。

1.3 接触

将端板与夹层混凝土绑定,与内、外钢管

表1 试验结果与有限元模拟结果比较

Table 1 Comparisons between the test and FEM results

试件 编号	$B(D_o \times t_o) /$ mm	$D_i \times t_i /$ mm	$f_{y,os} /$ MPa	$f_{y,is} /$ MPa	$f_{cu,core} /$ MPa	$f_{cu,out} /$ MPa	$T_{uc} /$ (kN·m)	$T_{uc} /$ (kN·m)	$T_{uc} / T_{uc}$	数据 来源
sc1-1	200	120 × 2.98	378	—	62.3	43.4	24.2	25.0	0.968	
sc1-2	200	120 × 2.98	378	—	62.3	43.4	24.3	25.0	0.972	
sc4-1	200	100 × 2.98	378	—	62.3	43.4	18.4	19.8	0.929	文献 [2]
sc4-2	200	100 × 2.98	378	—	62.3	43.4	18.5	19.8	0.934	
sc5-1	200	80 × 2.98	378	—	62.3	43.4	14.3	15.5	0.923	
sc5-2	200	80 × 2.98	378	—	62.3	43.4	14.2	15.5	0.916	
cpu1	165 × 3	42 × 3	260.0	326.6	50	—	25.1	26.2	0.958	
cpu2	165 × 3	75 × 5	260.0	355.4	50	—	33.2	33.1	1.003	
cpu3	165 × 4	42 × 3	286.4	326.6	50	—	34.5	35.4	0.975	文献 [12]
cpu4	165 × 4	75 × 5	286.4	355.4	64.5	—	41.0	42.3	0.969	
cpu5	165 × 4.6	42 × 3	365.6	326.6	64.5	—	47.8	49.0	0.976	
cpu6	165 × 4.6	75 × 5	365.6	355.4	64.5	—	53.6	55.7	0.962	

注:sc 表示中方钢管混凝土叠合构件,B 为截面边长;cpu 表示圆中空夹层钢管混凝土构件; $D_i$  与  $D_o$  分别为的内、外钢管直径; $t_i$  与  $t_o$  分别为内、外钢管厚度; $f_{y,is}$  与  $f_{y,os}$  分别为内、外钢管屈服强度; $f_{cu,core}$  与  $f_{cu,out}$  分别为夹层、外部混凝土强度; $T_{uc}$  与  $T_{uc}$  分别为扭矩的试验值、有限元模拟值。

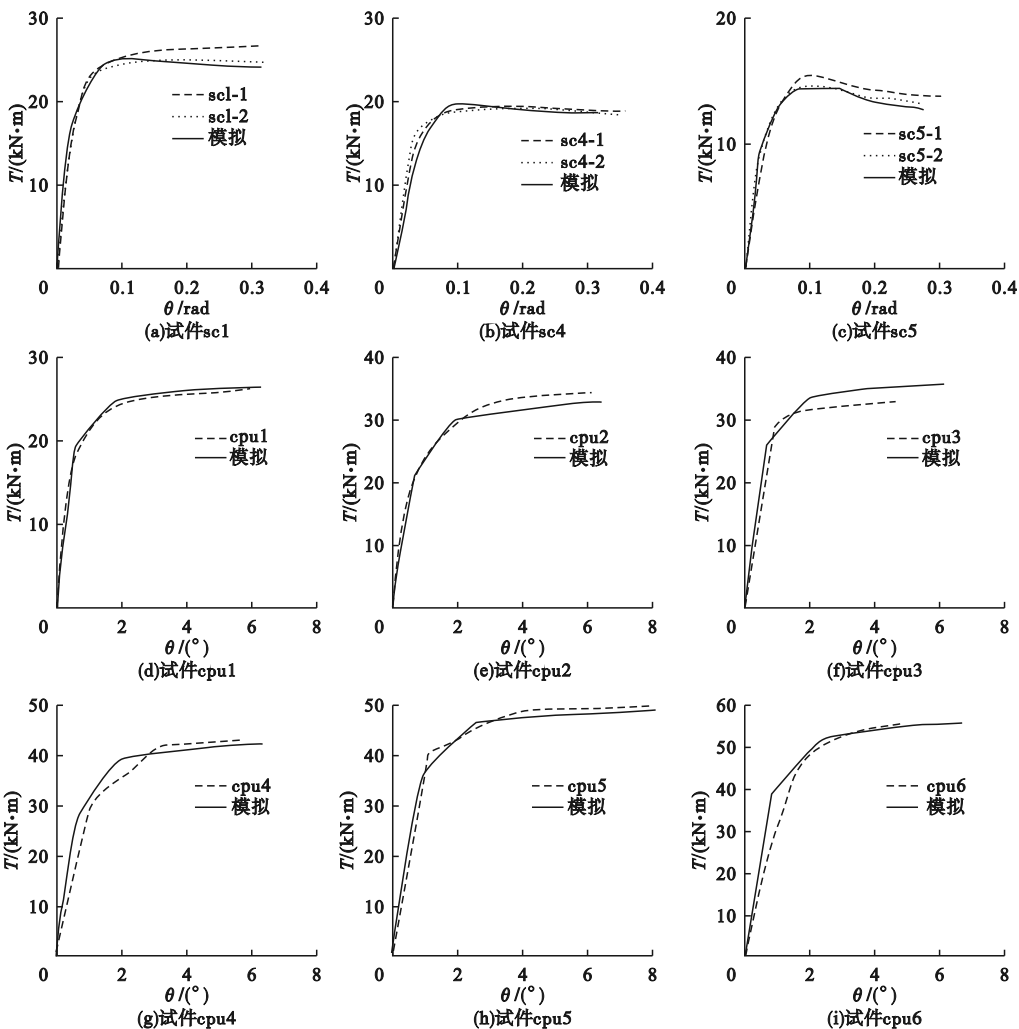


图2 试验与有限元模拟扭矩( $T$ )-转角( $\theta$ )曲线对比

Fig. 2 Comparisons of torque ( $T$ )-torsional angle ( $\theta$ ) curves between test results and FEM simulation

2 工作机理研究

采用上述建模方法,通过典型构件对方中空夹层钢管混凝土叠合构件纯扭性能进行研究,典型构件的基本参数: $B \times L = 200\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ ,  $D_o \times t_o = 120\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ,  $D_i \times t_i = 80\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ,夹层混凝土C60,外部混凝土C40,混凝土保护层厚度为25 mm;内、外钢管采用Q345钢材;纵筋为8B12,箍筋为B6@100,型号为HRB335。

2.1 破坏模态分析

图3为夹层混凝土与外部混凝土最大主塑性应变分布情况,两者最大塑性主应变方

向均与轴线成45°夹角,为受拉破坏。

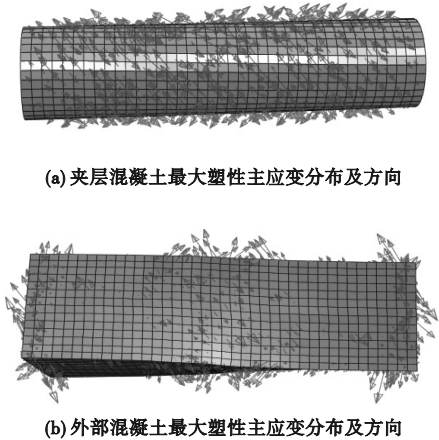


图3 混凝土破坏模态

Fig. 3 Failure modes of the concrete

2.2 受力全过程分析

典型构件的扭矩-转角曲线如图4所示。曲线未出现明显下降阶段,表现出良好的延性,可以分为以下三个阶段。

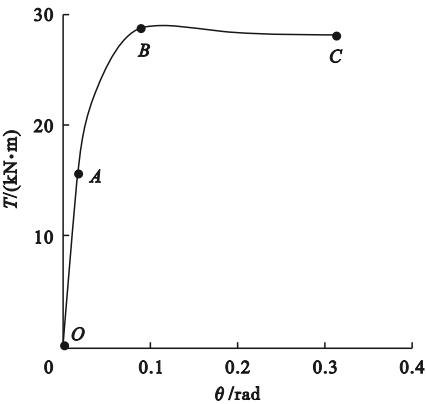


图4 典型构件的扭矩( $T$ )-转角( $\theta$ )曲线  
Fig.4 Torque( $T$ )-torsional angle( $\theta$ ) curve of the typical member

弹性阶段( $OA$ ):扭矩随转角增加而线性增加,各个部件之间有相互作用力产生,但相

对较小, $A$ 点为弹性阶段极限。

弹塑性阶段( $AB$ ):转角增长速度加快,内、外钢管基本屈服(内、外钢管中部完全屈服,两端分别达到屈服强度的93%、98%), $B$ 点为峰值扭矩(参考文献[13],定义构件边缘最大剪应变变为0.01时的扭矩为峰值扭矩)。

塑性阶段( $BC$ ):由于外部混凝土扭转翘曲导致弯曲法向应力产生,因此扭矩略有减小。

2.3 应力分析

$A$ 、 $B$ 、 $C$ 点内、外钢管的 Mises 应力分布云图如图5所示。 $A$ 点外钢管中部、两端的 Mises 应力分别达到屈服强度的62%、85%,内钢管的 Mises 应力相对较小,最大 Mises 应力为194 MPa。 $B$ 点内、外钢管基本屈服,其中部完全屈服,两端的 Mises 应力分别达到屈服强度的93%、98%。 $C$ 点内、外钢管完全屈服。

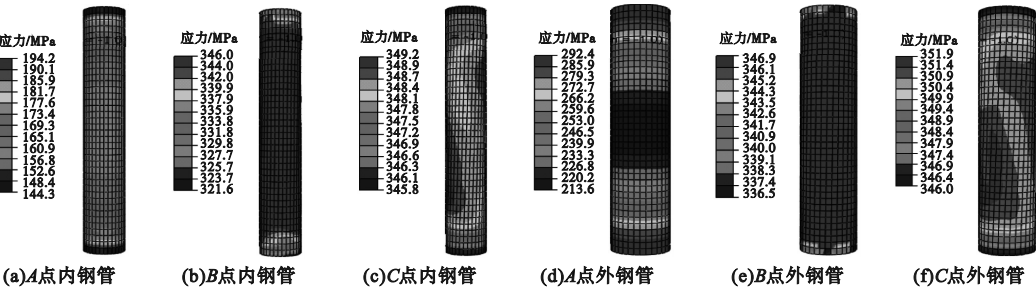


图5 钢管各特征点 Mises 应力云图

Fig.5 The Mises stress diagrams at each feature point of steel tube

图6为 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 点夹层混凝土、外部混凝土在固定端的剪应力 $S_{13}$ 分布云图。由于受到纯扭作用,截面产生几乎对称的剪应力,剪应力与随截面中心距离成正比。夹层混凝土在 $B$ 点之前,剪应力增长较快,在 $B$ 点之后(塑性阶段),剪应力增长减慢。外部混凝土则在 $A$ 点之前(弹性阶段),剪应力增长较快,在 $A$ 点之后,剪应力增长减慢。

2.4 相互作用力分析

构件在纯扭作用时,各部件之间协同受力,产生的相互作用如图7所示。设 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 分别为内钢管与夹层混凝土、夹层混凝土

与外钢管、外钢管与外部混凝土之间的相互作用力。参考文献[14]选取构件中部横截面,研究各部件之间的相互作用力。

由于内钢管相对于外钢管承担扭矩较小,所以 $P_1$ 始终小于 $P_2$ 。随着不断施加扭矩, $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 均逐渐增加。进入弹塑性阶段后,外钢管、内钢管先后屈服,相互作用力下降,此时外部混凝土与钢管分离,无相互作用产生, $P_3$ 下降至0。由于箍筋的约束作用, $P_1$ 、 $P_2$ 继续增加,二者的相互作用力达到最大,分别为1.3 MPa、2.5 MPa。



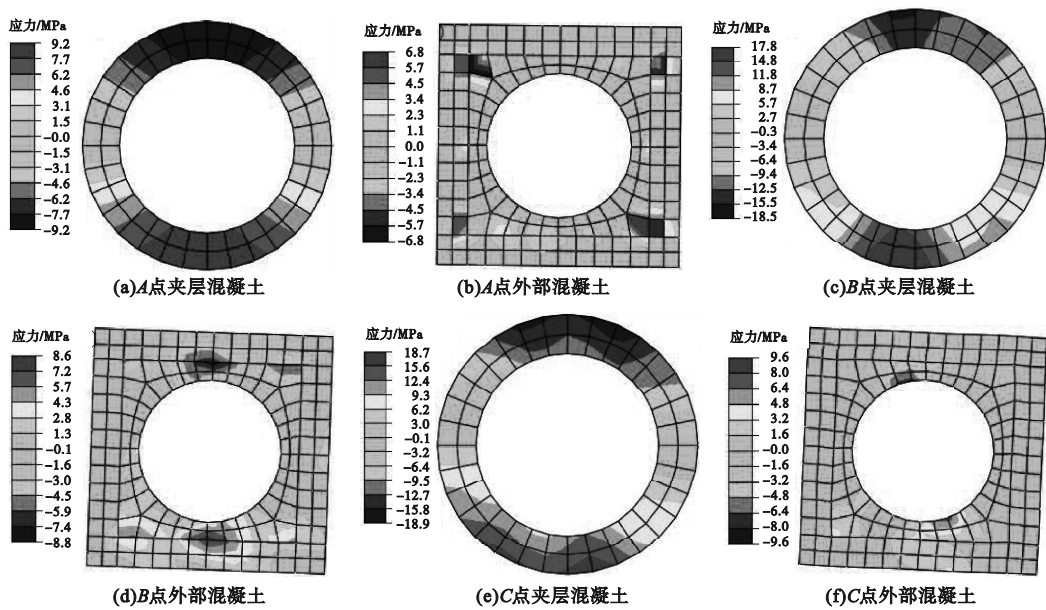


图6 混凝土各特征点切线方向应力云图

Fig. 6 The stress diagrams of tangent direction at each feature point

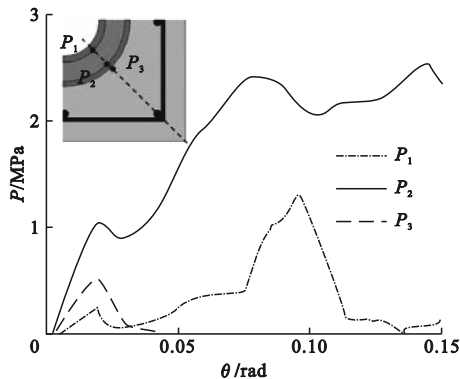


图7 构件各部分相互作用力变化规律

Fig. 7 The change laws of interaction force for each part of the member

3 参数分析

采用控制变量法,研究空心率( $\chi = D_i/B$ )、外钢管径厚比( $D_o/t_o$ )、内钢管径厚比( $D_i/t_i$ )等参数对方中空夹层钢管混凝土叠合构件强度系数( $SI = T_e/T_{uc}$ ,  $T_e$ 为构件在不同参数下的抗扭承载力; $T_{uc}$ 为典型构件的抗扭承载力)和初始刚度( $K = 0.2T_eH/\theta_{0.2}$ ,  $\theta_{0.2}$ 为不同参数下0.2倍构件抗扭承载力对应的扭转角度, $H$ 为构件高度)的影响。

3.1 夹层混凝土强度

不同夹层混凝土强度下的扭矩-转角曲

线如图8(a)所示。相对于典型构件,夹层混凝土强度为40 MPa、80 MPa时,构件的强度系数分别为0.952、1.014。夹层混凝土强度为40 MPa、60 MPa、80 MPa时,构件的初始刚度分别为486.3 ( $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ )/rad、529 ( $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ )/rad、540.2 ( $\text{kN} \cdot \text{m}^2$ )/rad,分别增加了8.8%、11.1%。增加夹层混凝土强度构件抗扭承载力有所提高,但幅度较小,是因为夹层混凝土处于扭转中心附近,所承担的扭矩较小。

3.2 外部混凝土强度

不同外部混凝土强度下的扭矩-转角曲线如图8(b)所示。相对于典型构件,外部混凝土强度为30 MPa、50 MPa时,构件的强度系数分别为0.961、1.007。外部混凝土强度为30 MPa、40 MPa、50 MPa时,构件的初始刚度几乎没有变化。混凝土强度高的构件曲线后期有下降趋势,是因为外部混凝土强度提高,来自箍筋的约束作用被削弱,从而降低了构件的整体延性。

3.3 纵筋强度

不同纵筋强度下的扭矩-转角曲线如图8(c)所示。相对于典型构件,纵筋强度为

235 MPa、400 MPa 时,构件的强度系数都为 1.000。纵筋强度为 235 MPa、335 MPa、400 MPa 时,构件的初始刚度几乎没有变化。纵筋面积占构件截面面积比例较小,主要起到和箍筋组成钢筋笼约束混凝土的作用,所以提高纵筋强度对构件抗扭承载力几乎没有影响。

3.4 箍筋间距

不同箍筋间距  $s$  下的扭矩 - 转角曲线如图 8(d) 所示。相对于典型构件,箍筋间距为 50 mm、150 mm 时,构件的强度系数分别为 1.018、0.989。箍筋间距为 50 mm、100 mm、150 mm 时,构件的初始刚度几乎没有变化。箍筋间距增大,对混凝土的约束作用减弱,抗扭承载力降低。因此增大箍筋间距构件抗扭承载力略微减小。

3.5 外钢管强度

不同外钢管强度下的扭矩 - 转角曲线如图 8(e) 所示。相对于典型构件,外钢管强度为 235 MPa、420 MPa 时,构件的强度系数分别为 0.845、1.047。外钢管强度为 235 MPa、345 MPa、420 MPa 时,构件的初始刚度几乎没有变化。由于夹层混凝土和外部混凝土有效限制了外钢管的屈曲,使其承受大部分扭矩,因此外钢管强度是影响构件抗扭承载力的重要参数。

3.6 内钢管强度

不同内钢管强度下的扭矩 - 转角曲线如图 8(f) 所示。相对于典型构件,内钢管强度为 235 MPa、420 MPa 时,构件的强度系数分别为 0.914、1.065。内钢管强度为 235 MPa、345 MPa、420 MPa 时,构件的初始刚度几乎没有变化。由于内钢管相对于其他部件承担扭矩较小,所以构件抗扭承载力有较大的提高。

3.7 空心率

不同空心率下的扭矩 - 转角曲线如图 8(g) 所示。相对于典型构件,空心率为 0.35、0.45 时,构件的强度系数分别为

0.950、1.043。空心率为 0.35、0.4、0.45 时,构件的初始刚度分别为  $521.7(\text{kN}\cdot\text{m}^2)/\text{rad}$ 、 $529(\text{kN}\cdot\text{m}^2)/\text{rad}$ 、 $537.8(\text{kN}\cdot\text{m}^2)/\text{rad}$ ,分别增加了 1.4%、3.1%。由于空心率增大,内钢管直径增大,含内钢管率增加,内钢管承担扭矩增大,所以提高空心率可以使构件抗扭承载力有较大的提高。

3.8 外钢管直径

不同外钢管直径下的扭矩 - 转角曲线如图 8(h) 所示。相对于典型构件,外钢管直径为 130 mm、140 mm 时,构件的强度系数分别为 1.147、1.194。外钢管直径为 120 mm、130 mm、140 mm 时,构件的初始刚度分别为  $529(\text{kN}\cdot\text{m}^2)/\text{rad}$ 、 $674.5(\text{kN}\cdot\text{m}^2)/\text{rad}$ 、 $866.4(\text{kN}\cdot\text{m}^2)/\text{rad}$ ,分别增加了 27.5%、63.8%。外钢管直径增大,构件含外钢管率提高,外钢管承担扭矩增大,由此可以看出外钢管直径是影响构件抗扭承载力和初始刚度的重要参数。

3.9 内钢管径厚比

不同内钢管径厚比下的扭矩 - 转角曲线如图 8(i) 所示。相对于典型构件,内钢管径厚比为 40、20 时,构件的强度系数分别为 0.964、1.022。内钢管径厚比为 40、27、20 时,构件的初始刚度分别为  $501.6(\text{kN}\cdot\text{m}^2)/\text{rad}$ 、 $529(\text{kN}\cdot\text{m}^2)/\text{rad}$ 、 $541.9(\text{kN}\cdot\text{m}^2)/\text{rad}$ ,分别增加了 5.5%、8.0%。可见,提高内钢管径厚比使构件抗扭承载力和初始刚度都有较大的提高。

3.10 外钢管径厚比

不同外钢管径厚比下的扭矩 - 转角曲线如图 8(j) 所示。相对于典型构件,外钢管径厚比为 60、30 时,构件的强度系数分别为 0.803、1.143。外钢管径厚比为 60、40、30 时,构件初始刚度分别为  $441.8(\text{kN}\cdot\text{m}^2)/\text{rad}$ 、 $529(\text{kN}\cdot\text{m}^2)/\text{rad}$ 、 $599.1(\text{kN}\cdot\text{m}^2)/\text{rad}$ ,分别增加了 19.7%、35.6%。可见,外钢管径厚比是影响构件抗扭承载力和初始刚度的重要参数。

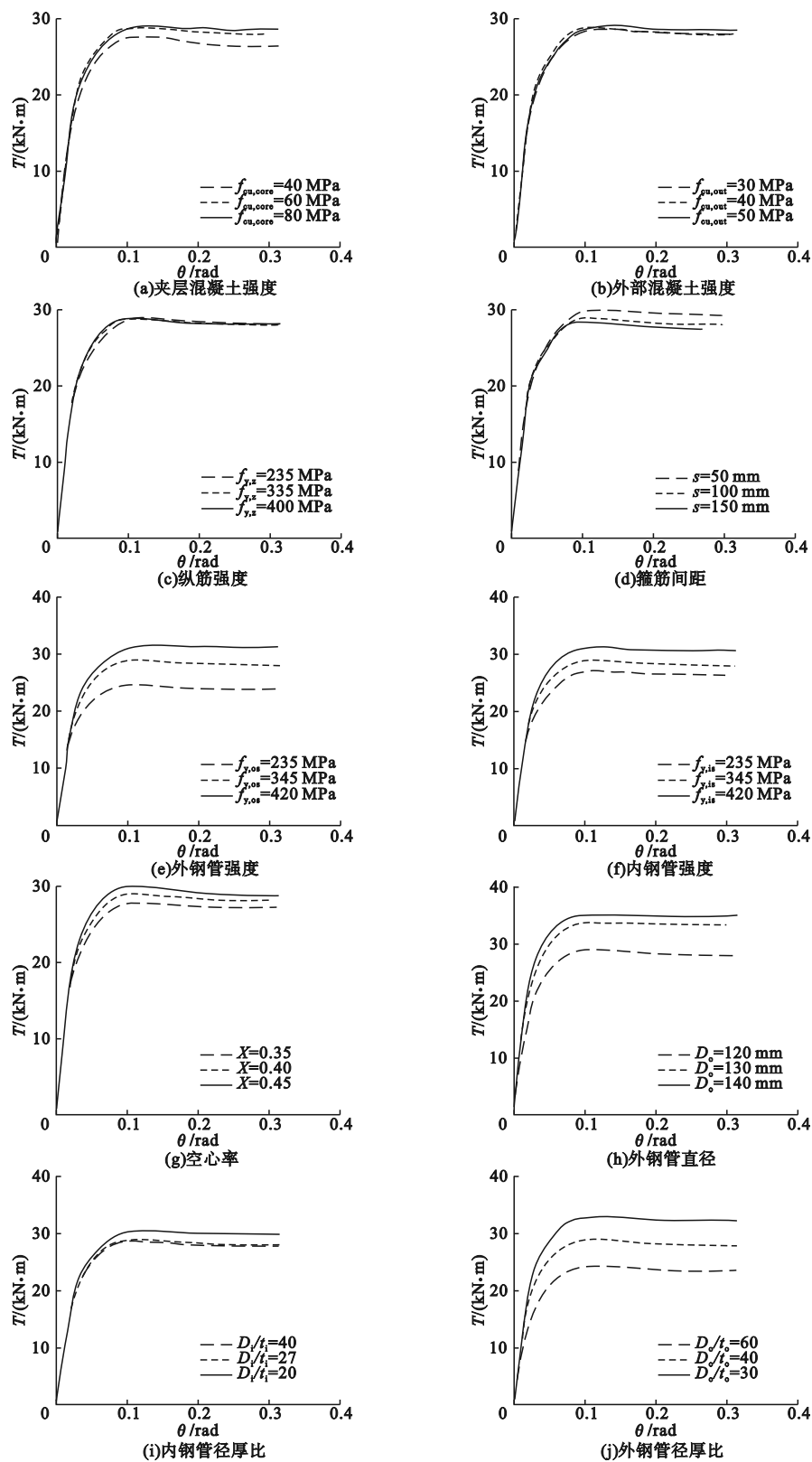


图 8 不同参数对扭矩 ( $T$ )-转角 ( $\theta$ ) 曲线的影响

Fig. 8 Effects of different parameters on the torque ( $T$ )-torsional angle ( $\theta$ ) curves



4 纯扭抗扭承载力公式

当方中空夹层钢管混凝土叠合构件达到峰值荷载时,外围钢筋混凝土与内部中空夹层钢管混凝土几乎无相互作用力产生,因此可采用叠加原理,中空夹层钢管混凝土叠合构件的抗扭承载力( $T_{ur}$ )计算式如下:

$$T_{ur} = T_{cfdst} + T_{rc} \tag{1}$$

式中: $T_{cfdst}$ 为中空夹层钢管混凝土抗扭承载力; $T_{rc}$ 为中空钢筋混凝土抗扭承载力。

4.1 中空夹层钢管混凝土计算公式

参考文献[15]中空夹层钢管混凝土纯扭承载力( $T_{cfdst}$ )计算公式如下:

$$T_{cfdst} = \gamma_t W_{sct} \tau_{scy} + W_{si} \tau_{yi} \tag{2}$$

$$\gamma_t = (-0.382\chi^2 + 0.0414\chi + 0.2669) \times \ln\xi - 0.1826\chi + 1.3013 \tag{3}$$

$$\tau_{scy} = (0.422 + 0.313\alpha^{2.33})\xi^{0.134}f_{scy} \tag{4}$$

$$f_{scy} = C_1\chi^2f_{yo} + C_2(1.14 + 1.02\xi)f_{ck} \tag{5}$$

$$W_{sct} = \frac{\pi(D^4 - D_i^4)}{16D} \tag{6}$$

$$W_{si} = \frac{\pi[D_i^4 - (D_i - 2t_i)^4]}{16D_i} \tag{7}$$

$$\tau_{yi} = \frac{f_i}{\sqrt{3}} \tag{8}$$

$$C_1 = \alpha/(1 + \alpha) \tag{9}$$

$$C_2 = (1 + \alpha_n)/(1 + \alpha) \tag{10}$$

式中: $\gamma_t$ 为抗扭承载力计算系数; $W_{sct}$ 、 $\tau_{scy}$ 分别为外钢管与夹层混凝土截面的抗扭模量、抗扭极限强度; $W_{si}$ 、 $\tau_{yi}$ 分别为内钢管截面抗扭模量、抗扭极限强度; $f_{scy}$ 为外钢管与夹层混凝土轴压强度设计值。

4.2 中空钢筋混凝土计算公式

根据文献[16]中空钢筋混凝土纯扭承载力( $T_{rc}$ )计算公式如下:

$$T_{rc} = 0.35f_{to}W_{to} + 1.2\sqrt{\xi}f_{yv}\frac{A_{sv}A_{cor}}{s} \tag{11}$$

$$W_{to} = \frac{b^2(3h - b)}{6} \tag{12}$$

$$\xi = \frac{f_{yo}A_{stl}s}{f_{yv}A_{sv}u_{cor}} \tag{13}$$

$$A_{cor} = \frac{b^2_{cor} - \pi d^2}{4} \tag{14}$$

式中: $f_{to}$ 为混凝土轴心抗拉强度标准值; $W_{to}$ 为混凝土截面受扭塑性抵抗矩; $\xi$ 为纵筋与箍筋的配筋强度比,取值0.6~1.7,大于1.7时,取1.7; $f_{yv}$ 为纵筋屈服强度; $A_{sv}$ 为单支箍截面面积; $A_{cor}$ 为箍筋包围部分面积。

4.3 计算结果分析

图9为不同参数下方中空夹层钢管混凝土叠合构件公式计算值( $T_{ur}$ )与有限元模拟值( $T_{uc}$ )的对比。由图可知,计算值与模拟值的偏差基本在10%以内,说明笔者提出的抗扭承载力计算公式相对可靠。

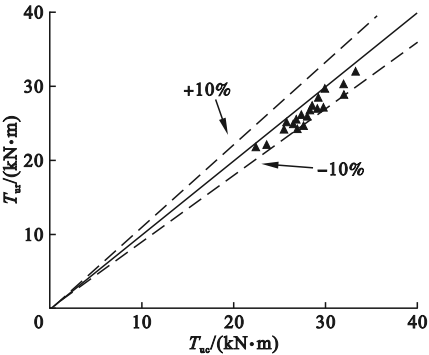


图9 公式计算值与模拟值对比

Fig. 9 Comparisons between formula results and FEM values

5 结 论

(1)方中空夹层钢管混凝土叠合构件扭矩-转角曲线未出现明显下降阶段,说明构件在纯扭作用下具有良好的延性;夹层混凝土和外部混凝土最大塑性主应变分布十分相似,构件在破坏前一起抵抗扭矩。

(2)外钢管强度、外钢管直径和外钢管径厚比是影响方中空夹层钢管混凝土叠合构件抗扭承载力的重要参数;相对于典型构件,外钢管强度由235 MPa增至420 MPa,强度系数增加了0.202;外钢管直径由120 mm增至140 mm,强度系数增加了0.194;外钢管

径厚比由 30 增至 60, 强度系数减小了 0.340。

(3) 采用叠加原理提出了抗扭承载力计算公式, 计算值与有限元模拟值的偏差基本在 10% 以内, 表明笔者提出的抗扭承载力计算公式相对可靠。

## 参考文献

- [1] 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 Ji'nan, LI Minglun, et al. Research on mechanical properties of hollow concrete-encased concrete filled steel tubes under eccentric compression [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(1): 35–42.)
- [2] REN Q X, HAN L H, HOU C, et al. Concrete-encased CFST columns under combined compression and torsion: experimental investigation [J]. Journal of constructional steel research, 2017, 138: 729–741.
- [3] LI S, HAN L H, HOU C. Concrete-encased CFST columns under combined compression and torsion: analytical behaviour [J]. Journal of constructional steel research, 2018, 144: 236–252.
- [4] HUANG H, HAN L H, ZHAO X L. Investigation on concrete filled double skin steel tubes (CFDSTs) under pure torsion [J]. Journal of constructional steel research, 2013, 90: 221–234.
- [5] LU G B, ZHOU X H, WANG Y H, et al. Numerical investigation on circular concrete-filled double skin steel tube columns under torsion [J]. Structures, 2022, 37: 17–31.
- [6] WANG Y H, LU G B, ZHOU X H. Experimental study of the cyclic behavior of concrete-filled double skin steel tube columns subjected to pure torsion [J]. Thin-walled structures, 2018, 122: 425–438.
- [7] DENG R, ZHOU X H, WANG Y H, et al. Experimental study on tapered concrete-filled double skin steel tubular columns under torsion [J]. Thin-walled structures, 2022, 177: 109444.
- [8] 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.)
- [9] 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.
- [10] ATTARD M M, SETUNGE S. Stress-strain relationship of confined and unconfined concrete [J]. ACI materials journal, 1996, 93(5): 432–442.
- [11] ZHAO X M, WU Y F, LEUNG A Y T. Analyses of plastic hinge regions in reinforced concrete beams under monotonic loading [J]. Engineering structures, 2012, 34: 466–482.
- [12] 黄宏, 陈梦成, 黄斌洁. 圆中空夹层钢管混凝土柱扭转实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(3): 288–294.  
(HUANG Hong, CHEN Mengcheng, HUANG Binjie. Experimental study on torsion of circular concrete filled double skin steel tubes column [J]. Experimental mechanics, 2012, 27(3): 288–294.)
- [13] 韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土纯扭转问题研究[J]. 工业建筑, 1995(1): 7–13.  
(HAN Linhai, ZHONG Shantong. Study on pure torsion problem of steel tube concrete [J]. Industrial construction, 1995(1): 7–13.)
- [14] 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. Study on mechanical properties of concrete filled double skin steel tubes under compression and bending [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.)
- [15] 中国土木工程学会. 中空夹层钢管混凝土结构技术规程: T/CCES7—2020 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.  
(China Civil Engineering Society. Technical specification for concrete filled double skin steel tubular structures: T/CCES7—2020 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2020.)
- [16] 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 People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2015.)  
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)