

文章编号: 1005-0523(2010)06-0001-06

# 圆中空夹层钢管混凝土纯扭构件工作机理研究

黄宏, 黄斌洁

(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:**圆中空夹层钢管混凝土是在两个同心放置的圆钢管中间灌注混凝土而形成的一种新型组合结构。已有学者对其在轴压、压弯、纯弯等方面及在往复荷载下的力学性能进行研究, 当被用作构筑物独立柱、输电塔杆、发电风车支架时其抗扭性能是十分重要的, 但目前还未见对这方面研究的报道。利用有限元软件 ABAQUS 建模对钢管混凝土纯扭构件进行计算, 数值模拟结果的正确性得到了试验结果的验证。在此基础上, 对圆中空夹层钢管混凝土纯扭构件的扭矩-转角全过程曲线进行了计算。计算结果表明, 扭矩-转角曲线可分为三个阶段: 弹性段、弹塑性段和塑性强化段, 通过对这三个阶段中内外钢管和混凝土的应力分布云图及其相互作用的分析, 揭示了圆中空夹层钢管混凝土在扭矩作用下的工作机理。

**关键词:**圆中空夹层钢管混凝土; 扭转; 有限元; 全过程分析

**中图分类号:** TU312

**文献标识码:** A

中空夹层钢管混凝土是在两个同心放置的钢管中间填充混凝土而形成的新型组合结构, 继承了普通钢管混凝土的承载力高、延性好、施工方便、经济性好等优点, 又由于特殊的截面形式而具有抗弯刚度大、自重轻、抗震性能和耐火性好等特点<sup>[1]</sup>。当中空夹层钢管混凝土被用作构筑物独立柱、输电塔杆、发电风车支架时会受到扭矩作用, 而国内外对这方面研究的报道尚属空白, 因此有必要对其抗扭性能进行研究。中空夹层钢管混凝土的内、外钢管可采用圆、方、矩形或其他截面形状钢管, 由于圆形钢管有利于防止局部屈曲, 因此, 本文拟对图 1 所示截面形式的圆中空夹层钢管混凝土构件进行研究, 图 1 中  $D_o$ 、 $D_i$ 、 $t_o$  和  $t_i$  分别为外钢管和内钢管的外径和厚度。

国内外已有研究者对实心钢管混凝土纯扭构件进行了试验研究和数值模拟。Kitada 和 Nakai (1991)<sup>[2]</sup>进行了 1 个方钢管混凝土短柱抗扭性能的试验研究, 同时也进行了空钢管和素混凝土短柱纯扭构件的对比实验。韩林海和钟善桐 (1995)<sup>[3]</sup>进行了 4 个圆钢管混凝土的纯扭试验研究。Beck 和 Kiyomiya (2003)<sup>[4]</sup>进行了圆钢管混凝土、素混凝土和空钢管柱纯扭构件的对比实验。尧国皇等 (2007)<sup>[5]</sup>采用有限元方法对钢管混凝土纯扭构件的荷载-变形关系进行计算, 并进行了参数分析。陈宇超等 (2009)<sup>[6]</sup>采用有限元软件对矩形钢管混凝土构件在纯扭受力状态下的力学性能进行了研究。

本文拟采用有限元方法对钢管混凝土纯扭构件的扭矩-转角关系进行计算, 并与其他研究者的试验结果进行对比。在数值模拟结果得到试验结果验证的基础上, 对圆中空夹层钢管混凝土纯扭构件的扭矩-转角全过程曲线进行计算。通过计算结果的全过程分析来研究圆中空夹层钢管混凝土构件在扭矩作用下的工作机理。

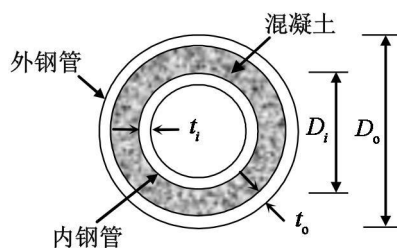


图 1 构件截面示意图

## 1 有限元模型的建立

利用有限元软件 ABAQUS 进行建模, 对圆中空夹层钢管混凝土纯扭构件的扭矩-转角全过程曲线进

收稿日期: 2010-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(51008122); 江西省自然科学基金(2009GZC0023)

作者简介: 黄宏 (1977-), 女, 副教授, 博士, 主要从事组合结构研究。

行计算。

### 1.1 单元类型和划分

由于模拟中空夹层钢管混凝土扭转构件,单元网格会产生扭曲,应选用减缩积分单元。本文盖板、内外钢管和混凝土均采用8节点减缩积分格式的三维实体单元(C8D8R)。模型截面采用结构化网格划分技术,在构件的长度方向上进行均匀的网格划分。

### 1.2 材料的本构关系模型

钢材的本构关系模型采用 ABAQUS 软件中的弹塑性模型,该模型在多轴应力状态下满足经典的 Von Mises 屈服准则,采用各向同性的强化法则。本文低碳软钢采用五段式二次塑流模型来描述其塑性性能的应力—应变关系曲线<sup>[7]</sup>。钢材弹性模量和泊松比分别取 206 000 MPa 和 0.3。盖板则考虑其为刚性材料,计算时弹性模量和泊松比分别为  $1 \times 10^{12}$  MPa 和  $1 \times 10^{-6}$ 。

混凝土的本构关系模型采用混凝土塑性损伤模型。该模型需要分别采用受拉和受压的应力—塑性应变关系来定义材料的性能。对于单调荷载下的受拉混凝土,采用能量破坏准则来考虑混凝土的受拉软化性能即应力—断裂能关系<sup>[8]</sup>。单轴受压应力—应变关系则采用刘威(2005)<sup>[9]</sup>改进的钢管混凝土中核心混凝土模型,该模型考虑了核心混凝土受钢管被动约束的特点,更适合有限元软件 ABAQUS 对核心混凝土受压应力—应变关系的分析。核心混凝土的泊松比  $\mu_c$  取 0.2,弹性模量按  $E_c = 4\,730 \sqrt{f_c}$  (MPa) 计算,其中  $f_c$  为混凝土圆柱体抗压强度。

### 1.3 钢管与混凝土的界面模型

盖板和内外钢管均采用绑定(Tie)约束,以保证加载转角位移时,盖板和钢管位移一致。盖板和混凝土的界面模型采用法向硬接触来模拟。内外钢管与混凝土的界面模型由法向的接触和切向的粘结滑移组成,在法向方向参考 Beck 和 Kiyomiya(2003)<sup>[4]</sup>的研究方法,采用接触刚度较大的单元来模拟,计算时接触单元刚度为  $1\,000 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。在钢管和混凝土的切向,采用库仑摩擦模型来模拟钢管与核心混凝土界面切向力的传递,摩擦系数  $\mu$  取 0.6。

### 1.4 边界条件

采用全构件模型进行模拟计算,计算模型如图 2 所示,模型一端为固定边界,另一端约束其竖向位移。采用位移加载方法,在非固定边盖板的几何中心设置参考点,在参考点处施加转角位移,该参考点和盖板上表面用 Couple 耦合。

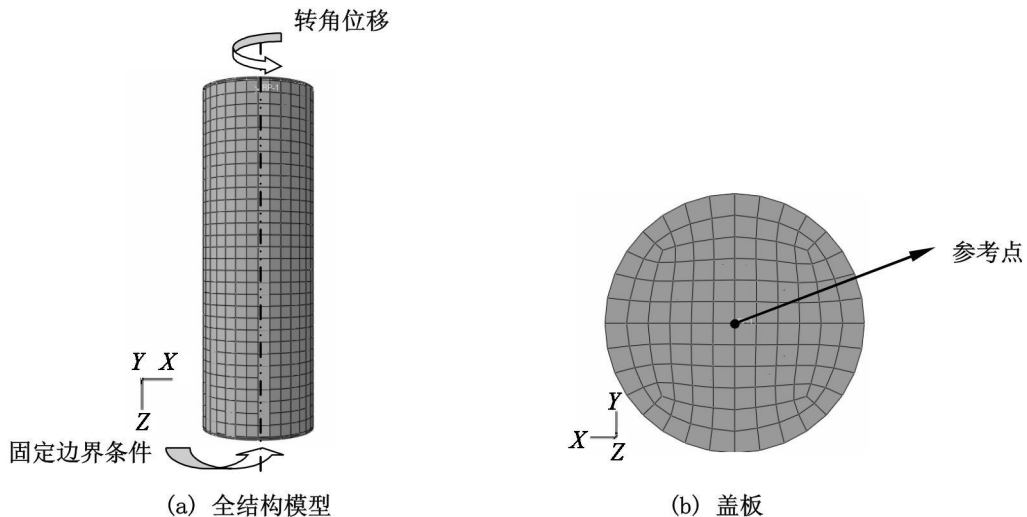


图 2 纯扭构件计算模型

## 2 数值模拟结果与试验结果对比

为了验证上述数值模型的正确性, 采用上述方法对圆钢管混凝土纯扭构件的扭矩—转角关系进行了计算, 并与文献[3, 10-12]的试验结果进行对比。对比结果见表 1, 其中  $D$  为圆钢管直径,  $t$  为管壁厚度,  $f_y$  为钢材的屈服强度,  $f_{cu}$  为混凝土立方体抗压强度,  $T_{ue}$  为试件抗扭强度试验值,  $T_{uc}$  为试件抗扭强度计算值, 其中抗扭强度  $T_{ue}$  和  $T_{uc}$  为试件边缘剪应变达  $10\ 000\ \mu\epsilon$  时对应的极限扭矩  $T_u$  [3]。表 1 中, 有限元计算的抗扭强度与试验测得抗扭强度的比值 ( $T_{uc}/T_{ue}$ ) 的平均值为 0.901, 均方差为 0.062。图 3 为表 1 中部分圆钢管混凝土纯扭试件扭矩—转角曲线计算结果与试验结果的比较。由此可见, 有限元计算结果与试验结果吻合较好, 且总体偏于安全。

表 1 纯扭试件一览表

序号	试件编号	$D \times t / \text{mm}$	$L / \text{mm}$	$f_s / \text{MPa}$	$f_{cu} / \text{MPa}$	$T_{uc} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$T_{ue} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$T_{uc} / T_{ue}$	数据来源
1	TCB1-1	133×4.5	450	324	33.3	29.0	24.5	0.846	文献[3]
2	TCB2-1	130×3.0	450	324	33.3	17.4	17.2	0.991	
3	TB1-1	133×4.5	2 000	324	30.4	28.2	24.9	0.882	
4	TB2-1	130×3.0	2 000	324	30.4	17.2	17.1	0.994	
5	CS1	114×4.5	387	280	33.1	19.7	15.6	0.795	文献[10]
6	CSS6	114×4.5	800	302	21.9	19.0	16.4	0.862	文献[11]
7	CSM6	114×4.5	1 480	302	20.6	18.5	16.3	0.883	
8	CSL6	114×4.5	2 280	302	22.2	17.8	16.3	0.916	
9	C-T	216.3×4.5	1 620	355	39.0	84.3	79.6	0.944	文献[12]

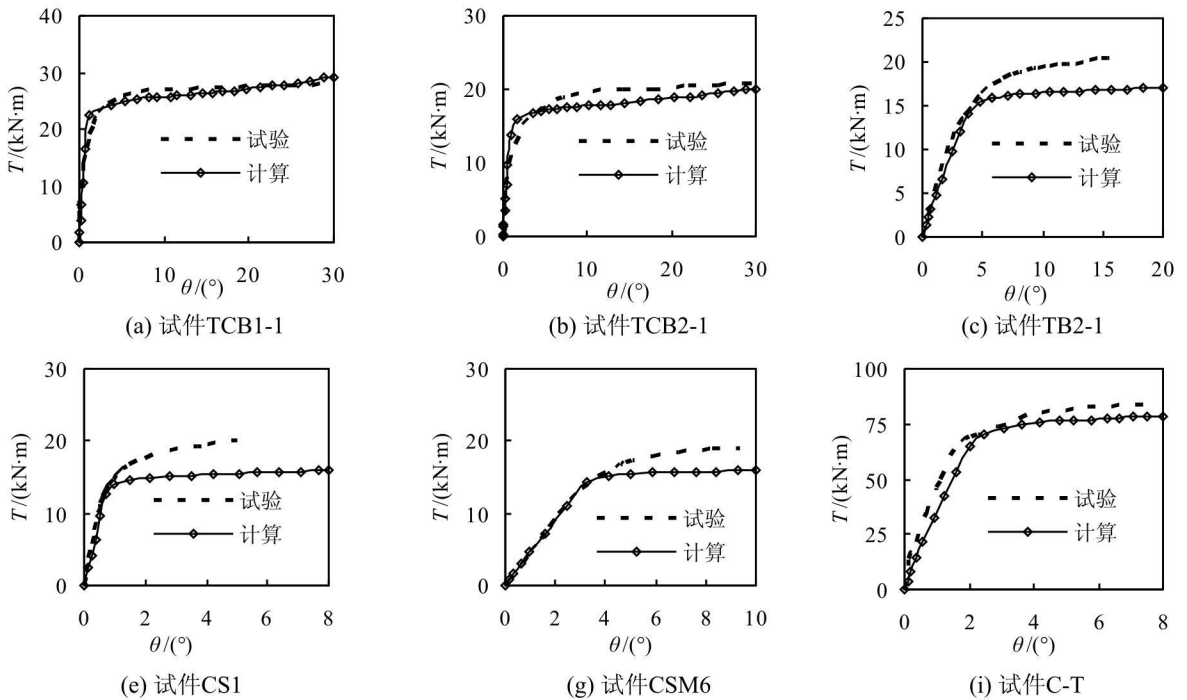


图 3 纯扭扭矩—转角曲线试验结果与计算结果的比较

## 3 工作机理研究

本节采用以上有限元计算模型, 通过典型算例对圆中空夹层钢管混凝土纯扭构件的工作机理进行研究, 典型算例的基本条件是:  $D_0 = 400\ \text{mm}$ ,  $t_0 = 9.31\ \text{mm}$ ,  $f_{y0} = 345\ \text{MPa}$ ,  $f_{y1} = 345\ \text{MPa}$ ,  $\alpha_n = 0.1$ ,  $\chi = 0.5$ ,

$D_i/t_i=60, L=1\ 200\ \text{mm}$ , 其中  $f_{y0}$  为外钢管的屈服强度,  $f_{yi}$  为内钢管屈服强度,  $\alpha_n$  为名义含钢率 ( $\alpha_n = A_{s0}/A_{co}$ ,  $A_{s0}$  为外管截面积,  $A_{co}$  为外管以为所包围的面条),  $\chi$  为空心率 ( $\chi = D_i/(D_o - 2t_o)$ )。典型算例的扭矩—转角全过程曲线如图 4 所示, 图中,  $T$  为扭矩,  $\theta$  为构件总扭转角。图 5 和图 6 给出了圆中空夹层钢管混凝土典型算例中钢管和混凝土截面  $a$  点、 $b$  点和  $c$  点对应的固定边界剪应力  $\tau_{xz}$  分布。圆中空夹层钢管混凝土纯扭构件的典型  $T-\theta$  曲线可分为下面几个阶段:

(1) 弹性阶段( $oa$ )在此阶段,  $T-\theta$  关系曲线基本呈直线关系, 内外钢管和混凝土全部参加工作, 三者一般是单独受力, 几乎无相互作用力产生。在此阶段, 混凝土截面剪应力增长较快(如图 5 (1)所示)。

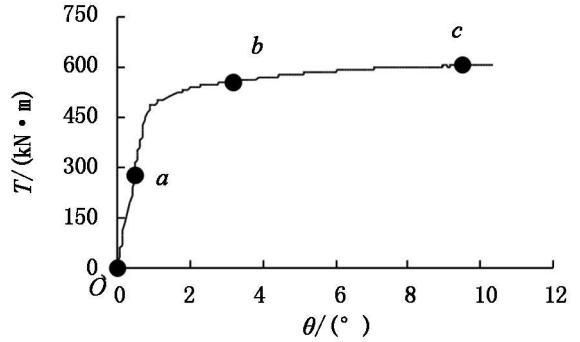


图 4 典型纯扭构件  $T-\theta$  关系曲线

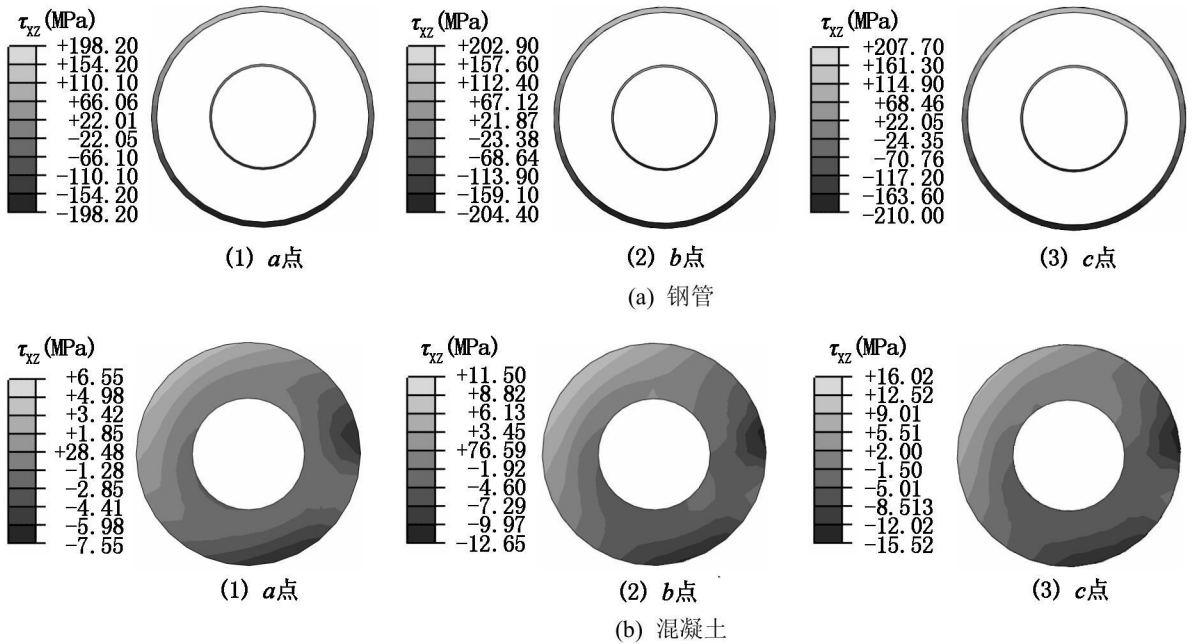


图 5 圆中空夹层钢管混凝土纯扭构件截面剪应力  $\tau_{xz}$  分布云图

(2) 弹塑性阶段( $ab$ )达到  $a$  点时外钢管进入弹塑性阶段, 内钢管也随后进入弹塑性阶段。在扭矩作用下, 内部混凝土开始发展微裂缝, 由于微裂缝的扩展, 使得混凝土的横向变形超过了钢管的横向变形, 这样三者之间产生了相互作用力。由于与混凝土的相互作用, 外钢管先达到屈服, 随后内钢管也达到屈服。钢管和核心混凝土均处于复杂受力状态之下, 但主要处于双向受剪的应力状态。当构件进入弹塑性阶段, 混凝土截面剪应力增长幅度减小。

(3) 塑性强化阶段( $bc$ ), 当钢管屈服后, 虽然混凝土已发展了微裂缝, 但由于受到外钢管的约束, 且由于混凝土的存在可以有效地抑制钢管的局部内凹屈曲, 从而使构件的抗扭承载力继续增长, 钢管混凝土表现出良好的塑性性能。在此阶段, 混凝土界面剪应力增长幅度趋于平缓。对于圆中空夹层钢管混凝土, 在受力过程中, 混凝土截面剪应力的分布始终是随着与截面中心距离的增加, 混凝土剪应力也增加(如图 6 所示)。

图 7 给出了圆中空夹层钢管混凝土纯扭构件典型算例在受力过程中内外钢管与混凝土之间的相互作用力沿构件截面的分布。由图可见, 外钢管主要以受压为主, 而内钢管则受到拉力作用, 这是因为内部混凝土在扭矩作用下发展裂缝使其横向变形超过钢管的横向变形。圆中空夹层钢管混凝土纯扭构件内外钢管的约束力在与构件成  $45^\circ$  左右的截面处较大。圆中空夹层钢管混凝土中的混凝土在扭矩的作用下的开裂为拉裂, 其破坏面为  $45^\circ$  左右翘曲面。但由于内外钢管的约束作用, 使混凝土裂缝的发展得到延缓并且阻止其发生错位, 因此沿轴线成  $45^\circ$  左右翘曲面上产生比其他位置更大的相互作用力。

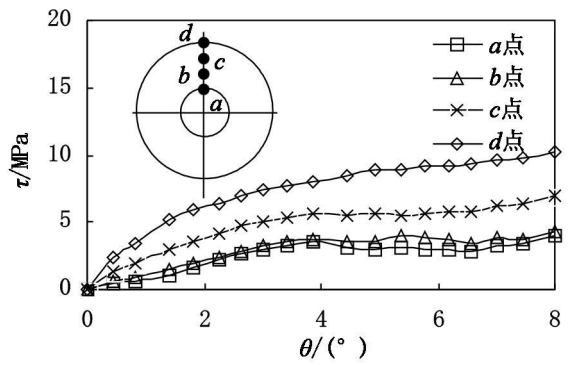


图 6 纯扭构件混凝土不同位置处剪应力 ( $\tau-\theta$ ) 关系曲线

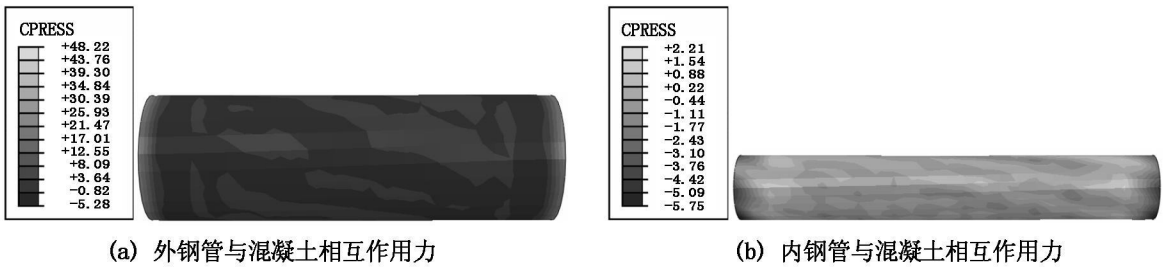


图 7 纯扭构件内外钢管与混凝土相互作用力分布 (MPa)

## 4 结语

通过本文的分析可得如下结论:

- (1) 本文所建立的有限元模型能很好的模拟钢管混凝土纯扭构件, 计算所得的构件抗扭承载力与试验结果符合良好, 并且计算结果总体趋于安全。
- (2) 在此基础上, 计算了圆中空夹层钢管混凝土纯扭构件典型算例的扭矩-转角全曲线。全曲线分为三个阶段: 弹性段、弹塑性段和塑性强化段。全曲线不出现下降段, 表明圆中空夹层钢管混凝土纯扭构件具有良好的塑性能。
- (3) 通过分析三个阶段中的内外钢管和混凝土的剪应力分布以及他们之间的相互作用力, 表明钢管和混凝土在扭矩作用下能充分发挥各自的受力优势, 使得圆中空夹层钢管混凝土具有优良的抗扭受力性能。

## 参考文献:

[1] 黄宏, 韩林海, 陶忠. 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.

[2] KITADA T, NAKAI H. Experimental study on ultimate strength of concrete filled square steel short members subjected to compression or torsion[C]//Proceeding of the Inter-Confer. On Steel-concrete Composite Structures. Fukuoke, Japan, 1991, 137-142.

[3] 韩林海. 钢管混凝土纯扭转问题研究[J]. 工业建筑, 1995, 25(1): 7-13.

[4] BECK J, KIYOMIYA O. Fundamental pure torsional properties of concrete filled circular steel tubes[J]. Materials, Conc. Struct. Pavaments, JSCE, 2003, 60(739): 285-296.

[5] HAN LINHAI, YAO GUOHUANG, TAO ZHONG. Perfomance of concrete-filled thin-walled steel tubes under pure torsion[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(1): 24-36.

[6] 陈宇超, 张鹏鹏, 王文达. 矩形钢管混凝土构件扭转性能初探[C]. 中国钢结构协会钢-混凝土组合结构分会第十二次

学术会议论文集, 2009: 13-16.

- [7] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [8] HILLER A, MODEER N W, MCHENRY P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 733-782.
- [9] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.
- [10] 宫安. 钢管混凝土短柱在压扭复合受力下的研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 1989.
- [11] 周竞. 钢管混凝土中长柱在压扭复合受力下的试验研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 1990.
- [12] 陈逸玮. 钢管混凝土柱形状因素于扭转韧性行为研究[D]. 国立中央大学土木工程系, 2003.

## Mechanism of Concrete-filled Double-skin Steel Tubular Column (CHS inner and CHS outer) Subjected to Pure Torsion

Huang Hong, Huang Binjie

(School of Civil Engineering and Architecture, East of China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Concrete filled double-skin steel tubular (CFDST) column is a new type of composite structure filled with concrete between two concentric steel tubes. The outer steel tube and the inner steel tube are circular hollow section (CHS). Some scholars have studied the mechanical properties of the (CFDST) column subjected to axial compression, compression bending, pure bending, hysteresis load etc. It is very important for the torsion property of the (CFDST) column when used as an independent column, transmission tower, and windmill power generation. But there is no report on torsion performance of the (CFDST) column now. The pure torsion property of the concrete filled steel tube column is analyzed by ABAQUS software, and it is verified by the experimental results. The torque-angle relationship curve of the (CFDST) subjected to pure torsion is calculated afterwards. The results indicate that the torque-angle curve can be divided into elastic, plastic and plastic hardening stages. Based on the result, the stress distribution of steel tubes and concrete and the interaction between the steel tubes and concrete are analyzed. Finally, the work mechanism of the (CFDST) column under torsion is revealed.

**Key words:** concrete filled double-skin steel tubular (CFDST); torsion; finite element method; complete analysis

(责任编辑 王全金)