

文章编号:1005-0523(2013)04-0024-06

方中空夹层钢管混凝土压弯扭构件数值模拟

黄宏,李婷,陈梦成

(华东交通大学土木建筑学院,江西南昌330013)

摘要:利用有限元方法对方中空夹层钢管混凝土和方实心钢管混凝土压弯扭构件的受力全过程进行计算,对比分析该两种构件的工作机理。分析结果表明,在压弯扭受力状态下,方中空构件与方实心构件抗扭承载力相当,方中空构件的延性优于方实心构件;截面角部处外钢管与混凝土的相互作用力远大于截面中部处的;两种构件的钢管与混凝土分别承担的纵向荷载与纵向应变关系曲线的整体变化趋势大致相同;方中空构件的内外钢管承担的扭矩大于方实心构件钢管承担的扭矩,夹层混凝土承担的扭矩小于核心混凝土承担的扭矩;由于钢管对混凝土的约束,使得混凝土承担了26%~33%的扭矩,而混凝土的存在阻止了钢管屈曲的产生。

关键词:中空夹层钢管混凝土;实心钢管混凝土;压弯扭;有限元

中图分类号:TU398+.9

文献标志码:A

将两根钢管同心摆放,在其间浇入混凝土就形成了一种新型的组合结构:中空夹层钢管混凝土,它具有承载力高、自重轻、抗弯刚度大、抗震性能好、塑性好和抗火性能好等优点。实际结构工程中,当地铁站台柱、风力发电塔和框架角柱采用中空夹层钢管混凝土结构时,构件除承受轴力和弯矩外,还有风荷载和地震荷载产生的扭矩,当排架角柱采用平腹杆双肢柱时,也会受到轴力、弯矩和扭矩的共同作用。由于方形钢管节点形式简单,有利于梁柱节点间的连接,节省模板,施工方便快捷,造价经济合理^[1-2],因此本文将对外钢管截面为方形、内钢管截面为圆形的中空夹层钢管混凝土构件(即方中空夹层钢管混凝土构件)在压弯扭受力状态下的力学性能进行研究。

现已有学者对钢管混凝土和中空夹层钢管混凝土构件在复合受力下的力学性能进行了研究,但还未见有方中空夹层钢管混凝土构件压弯扭复合受力的相关研究报道。韩林海和钟善桐(1995)^[3]对圆实心钢管混凝土构件进行了压弯扭理论及试验研究,分析表明,理论结果与试验结果符合良好。韩林海等(2007)^[4]运用有限元法分析研究了钢管混凝土柱扭转力学性能,通过回归分析得出简化计算公式,简化计算结果与有限元计算结果吻合良好。尧国皇(2008)^[5]利用有限元软件对矩形钢管混凝土弯扭构件进行了力学性能的研究,在计算结果得到试验结果验证基础上,分析了不同加载路径对矩形钢管混凝土弯扭构件的影响,并提出了矩形钢管混凝土弯扭构件承载力相关简化计算方程,且计算结果与试验结果吻合较好。黎玉婷等(2011)^[6]通过极限平衡理论推导了钢管混凝土在压-弯-剪-扭复杂受力下的相关承载力方程,理论计算结果与既有试验结果,吻合较好,验证了该理论计算的可行性。查晓雄等(2012)^[7]通过理论分析得出了相应的扭转刚度和等效剪切模量的理论公式,并结合有限元分析做出了修改,最后将该理论计算结果与有限元结果对比,吻合较好。聂建国等(2012)^[8]变化不同截面、钢筋比和轴压比参数,对8个在纯扭和压扭循环加载作用下的钢管混凝土柱的拟静力试验进行了研究,试验结果显示钢管混凝土的滞回曲线很饱满,验证了

收稿日期:2013-06-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51008122);973计划前期研究专项(2011CB612210);江西省教育厅科技计划落地项目;江西省自然科学基金项目(20122BAB206006)

作者简介:黄宏(1977-),女,副教授,博士,从事组合结构研究。

钢管混凝土柱有较好的抗震性能。范志杰(2012)^[9]对圆中空夹层钢管混凝土构件进行了压弯扭复合受力试验研究,并使用有限元软件对扭矩-转角相关曲线进行了分析,并对其工作机理进行了研究,得出有限元计算结果与试验结果吻合较好。聂建国等(2012)^[10]以截面形式、加载方式和弯矩比等为变化参数,采用自制的压力-弯矩-扭矩复合受力加载装置对8个钢管混凝土柱试件进行了压-弯-扭复合受力作用下的拟静力试验。试验结果表明,圆钢管混凝土柱和矩形钢管混凝土柱在压弯扭复合受力往复荷载作用下的滞回曲线较饱满,弯矩的存在将减小钢管混凝土柱的抗扭能力,钢管剪应变与转角间有较好的线性关系。

本文将采用有限元软件ABAQUS对方中空夹层钢管混凝土典型构件在压弯扭复合受力状态下的破坏形态、扭矩-转角全过程曲线、跨中截面处钢管与混凝土之间的相互作用以及钢管与混凝土各自承担的纵向荷载和扭矩进行分析,并与相同受力条件下的方实心钢管混凝土(在单层方形钢管内浇灌混凝土形成的构件)进行了对比分析。以下将方中空夹层钢管混凝土构件简称为方中空构件,方实心钢管混凝土构件简称为方实心构件。

1 有限元模型的建立

本文有限元计算模型中单元类型、材料的本构关系、界面模型均与文献^[11]相同。构件的边界条件为:采用全构件进行模拟分析,构件一端固定,一端自由,先给构件自由端施加偏心荷载,并保持该荷载不变,并在盖板中心处施加转角位移以达到施加扭矩荷载的目的,偏压荷载采用力加载,扭矩采用位移加载,在自由端中心处设置参考点,在参考点处施加转角位移,参考点与盖板表面采用耦合(Couple)。网格划分采用结构化网格划分方法,其中构件纵向和横向网格划分保证在1:1左右。

2 工作机理分析

采用上述有限元建模方法,研究方中空构件的破坏模态、扭矩-转角全过程曲线、跨中截面处钢管与混凝土间的相互作用力以及构件中钢管和混凝土各自承担的纵向荷载和扭矩。其典型算例为:对外钢管,边长 $B_o = 400$ mm,厚度 $t_o = 9.3$ mm,屈服强度 $f_{yo} = 345$ MPa;对内钢管,直径 $D_i = 190.7$ mm,厚度 $t_i = 3.18$ mm,屈服强度 $f_{yi} = 345$ MPa;混凝土强度为C60,构件长度 $L = 1\ 200$ mm,轴压比 $n = 0.4$,偏心距 $e = 50$ mm。为了深入分析方中空构件在压弯扭作用下的工作机理,将方实心构件及双层空钢管与之对比。方实心构件的压弯扭算例条件除内管特征外与方中空构件相同。

2.1 破坏模态

方中空夹层钢管混凝土与双层空钢管压弯扭破坏模态对比见图1。

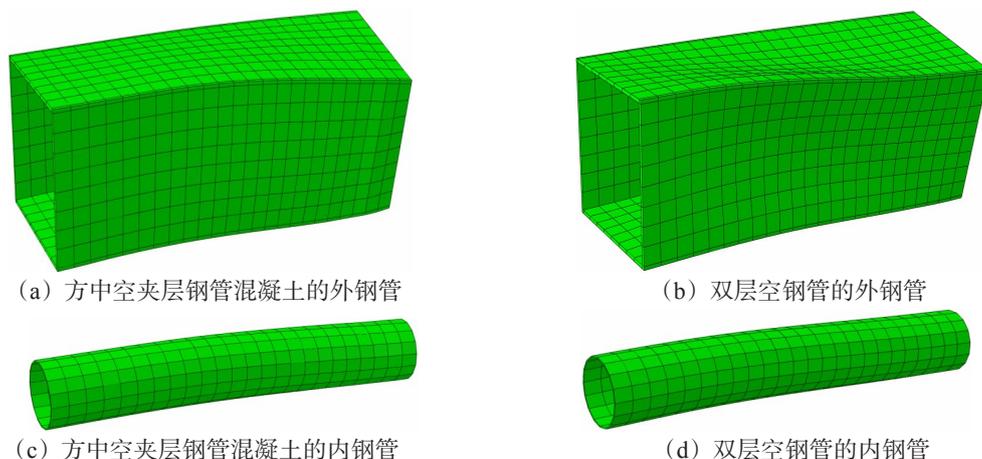


图1 方中空夹层钢管混凝土与双层空钢管压弯扭破坏模态对比

Fig.1 Comparisons of failure modes between CFDSST and double skin hollow steel tubes subjected to compression-bending-torsion

方中空压弯扭构件在先偏压后扭的作用下,构件表现出扭转破坏。图1分别给出了方中空构件与双层空钢管在压弯扭状态下各内外钢管破坏模式,双层空钢管建模时在钢管两端设置盖板。通过图1可以得出,方中空构件与双层空钢管二者的破坏模式有较大差别,双层空钢管的外钢管出现了明显的斜向凹曲,最终形成塑性铰而破坏,由于内钢管较细长且受到偏心压力的作用使得内钢管出现了较小的弯曲变形。方中空构件的外钢管由于夹层混凝土的存在而没有表现出明显的屈曲现象;其内钢管也因夹层混凝土的存在而未出现明显的弯曲现象。对于方实心构件钢管变形与方中空构件外钢管变形相类似,故未在图1中列出。

2.2 扭矩-转角全过程曲线

图2给出了方中空构件和方实心构件在压弯扭受力状态下的扭矩(T)-转角(θ)关系曲线,方中空构件和方实心构件在压弯扭受力状态下的典型 T - θ 关系曲线均可分为3个阶段:

1) 弹性阶段(OA) A 点为钢管 Mises 应力达到钢材比例极限的点。

2) 弹塑性阶段(AB) B 点为荷载峰值点即极限承载力点。

3) 塑性阶段(BC) C 点为转角较大的点(如转角为 6° 时)。

比较两条 T - θ 关系曲线可知,空心率为0.5的方中空构件与方实心构件,在 OB 阶段,二者曲线基本重合,极限承载力相差不大;在 B 点以后的阶段,空心率为0.5的方中空构件的延性性能优于方实心构件。

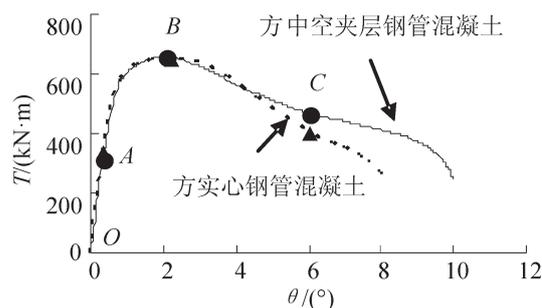


图2 典型压弯扭构件 T - θ 关系曲线
Fig.2 Typical T - θ curve

2.3 钢管与混凝土间的相互作用

图3给出了方中空构件和方实心构件在压弯扭作用下,在跨中截面上各中部和角部处的外钢管与混凝土间的相互作用力(p)在受力过程中的分布情况,1~8点均为跨中截面处混凝土和钢管接触的点,其中截面中1点、5点和3点、7点均为偏心受压一侧的点。

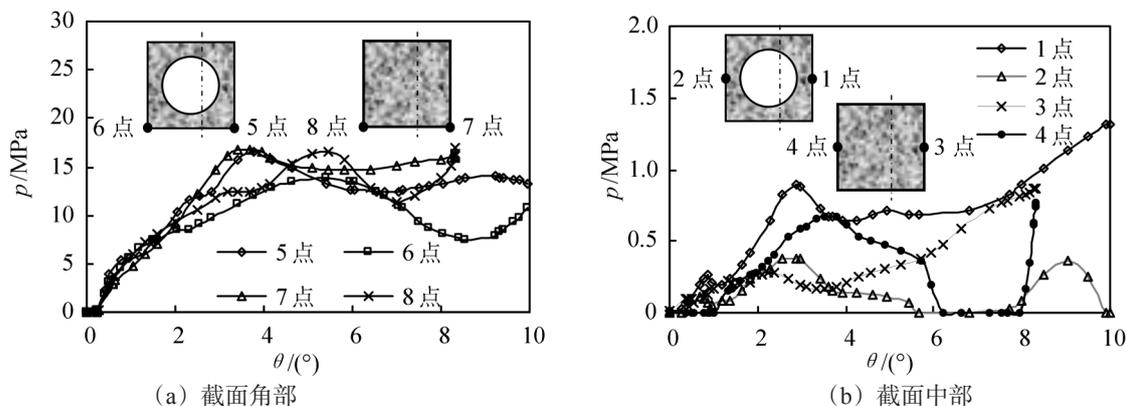


图3 在跨中截面外钢管与混凝土相互作用力 p

Fig.3 Interaction stress p between outer steel tube and concrete in the section of mid-span

在偏压阶段,跨中截面角部处外钢管与混凝土间的相互作用力均为零,通过图3(a)可知,角部的相互作用力在弹塑性阶段增长较快。在偏压阶段,跨中截面中部处外钢管与混凝土间相互作用力很小,接近零。由图3(b)可知,在偏压扭阶段,1点处的相互作用力大于2点处的相互作用力,3点和4点处的相互作用力变化无明显规律。结合图3中(a)、(b)可得,外钢管受力主要以受压为主,且角部处外钢管与混凝土间的相互作用力较大,中部则相对很小。在方中空构件偏压受力阶段,内钢管与混凝土间有很小的相互作用

力,但在构件进入弹性阶段后,其相互作用力开始下降,弹性阶段的 A 点后,其相互作用力为零。

2.4 钢管与混凝土各自承担的荷载

图4中(a)、(b)分别为方中空构件、方实心构件在压弯扭受力过程中内外钢管和夹层混凝土分别承担的纵向荷载与纵向应变的关系曲线。由图4(a)可知,在偏压受力阶段,钢管与夹层混凝土间已经产生相互作用,内外钢管与夹层混凝土承担的纵向荷载基本相等,且随纵向应变线性增长。进入偏压扭阶段后,在偏心压力和扭矩的共同作用下,使得内外钢管与夹层混凝土发生应力重分布。在弹性阶段(OA),随扭矩的增加,夹层混凝土承担的纵向荷载随纵向应变的增大而减小,且变化幅度较大,而内外钢管承担的纵向荷载则随着纵向应变的增大而增大,随着转角和扭矩的继续增加,钢管 Mises 应力达到比例极限,此时,内外钢管承担的纵向荷载随纵向应变的增大而减小,夹层混凝土承担的纵向荷载则增大。在弹塑性阶段(AB),随转角和扭矩继续增大,夹层混凝土开始出现微裂缝,夹层混凝土所承担的纵向荷载开始减小,内外钢管承担的纵向荷载则随着纵向应变的增大而增大。至塑性阶段(BC),内外钢管与夹层混凝土各自承担的纵向荷载基本保持在一定的比例上。

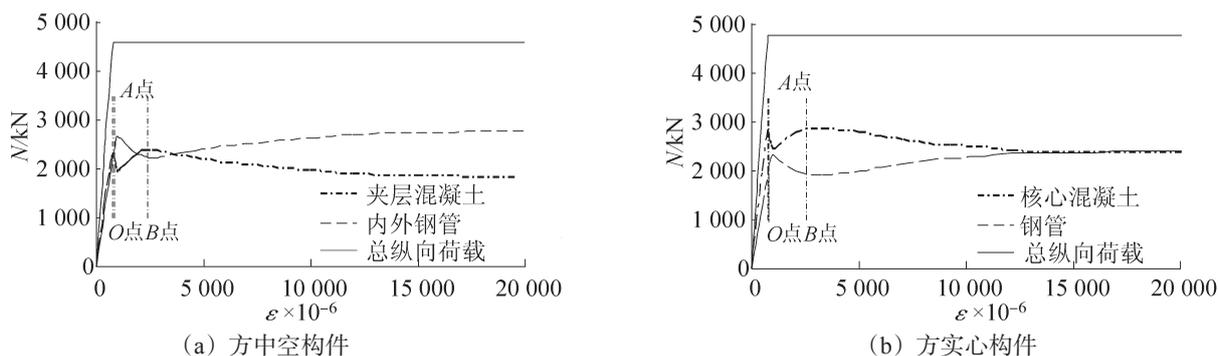


图4 构件中钢管与混凝土各自承担的纵向荷载随纵向应变的变化

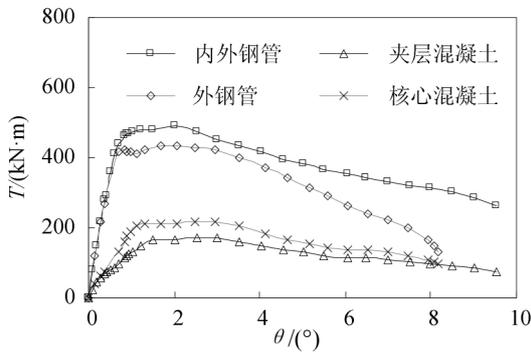
Fig.4 Longitudinal compression borne by steel tube and concrete versus longitudinal strain

结合图4(a)、(b)可知,在相同压弯扭受力条件下,方实心构件钢管和核心混凝土分别承担的纵向荷载-纵向应变关系曲线的整体变化趋势与方中空构件的大致相同。不同之处有,因方实心构件核心混凝土截面面积较大,其典型构件在偏压受力阶段时,核心混凝土承担的纵向荷载大于钢管承担的纵向荷载,在塑性阶段(BC),核心混凝土承担的纵向荷载开始随纵向应变的增大而减小,到后期核心混凝土与钢管各自承担的纵向荷载基本相等。

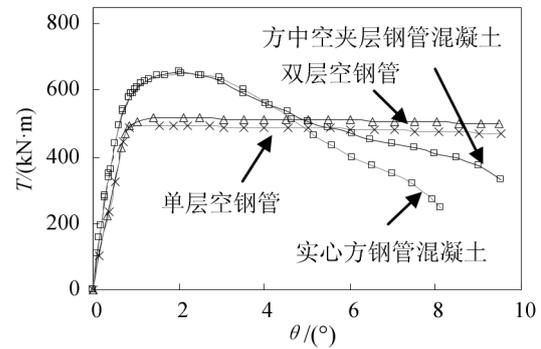
图5(a)比较了方中空构件的内外钢管与方实心构件的钢管及夹层混凝土与核心混凝土各自承担的扭矩与转角关系曲线。

由图5(a)可知,在弹塑性阶段 B 点(即极限承载力点)时,方中空构件的内外钢管承担了74%的扭矩;实心方钢管混凝土典型构件的钢管承担了67%的扭矩,可知,方中空构件的内钢管承担了一部分的扭矩。由于方实心构件的核心混凝土截面面积大于方中空构件的夹层混凝土截面面积,故核心混凝土承担扭矩大于夹层混凝土承担的扭矩。

取方中空和方实心构件在 $\theta=0^\circ$ 时,所对应的各自钢管承担的纵向荷载,分别对双层空钢管和单层空钢管在压弯扭受力状态下的抗扭承载力进行计算,其结果如图5(b)所示。由图5(b)可知,空心率为0.5的方中空构件和方实心构件抗扭承载力相当,方中空构件延性性能优于方实心构件;方中空构件、方实心构件、双层空钢管和单层空钢管构件均表现出良好的塑性性能,在压弯扭受力状态下,方中空构件、方实心构件的抗扭承载力各自大于双层空钢管和单层空钢管的抗扭承载力,这说明两种构件中的混凝土对构件的抗扭承载力有贡献,两种构件中混凝土和钢管结合在一起均起到良好的组合效应。



(a) 钢管与内外钢管、核心混凝土与夹层混凝土的比较



(b) 方中空、方实心构件与双、单层空钢管比较

图5 $T-\theta$ 关系曲线
Fig.5 Typical $T-\theta$ curve

3 结语

通过对相同压弯扭受力条件下的方中空、方实心构件的分析可以得出以下几点结论:

- 1) 空心率为0.5的方中空构件与方实心构件的抗扭承载力相当,且方中空构件的延性性能优于方实心构件。
- 2) 方中空构件和方实心构件在跨中截面处,其角部的外钢管与混凝土的相互作用力远大于中部的。
- 3) 两种构件的钢管与混凝土分别承担的纵向荷载与纵向应变关系曲线的整体变化趋势大致相同。
- 4) 方中空构件的内外钢管承担的扭矩大于方实心构件钢管承担的扭矩,方中空构件的内钢管承担了一部分的扭矩,夹层混凝土截面面积小于核心混凝土截面面积,使得夹层混凝土承担的扭矩小于核心混凝土承担的扭矩。

参考文献:

- [1] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2004:1-66.
- [2] 陶忠,于清. 新型组合结构柱-试验、理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2006:1-10,73-75.
- [3] 韩林海,钟善桐. 钢管混凝土压弯扭构件工作机理及性能研究[J]. 建筑结构学报,1995,16(4):32-39.
- [4] HAN LH, YAO GH, TAO Z. Behaviors of concrete filled steel tubular members subjected to combined loading [J]. Thin-walled Structures,2007,45:600-619.
- [5] 尧国皇,宋宝东,黄用军. 矩形钢管弯扭构件的工作性能研究[J]. 钢结构,2008,23(9):16-21.
- [6] 黎玉婷,查晓雄. 空、实心钢管混凝土构件复杂受力下统一公式——压-弯-剪-扭相关方程[J]. 工业建筑,2011,41(6):9-14.
- [7] 查晓雄,谢先义. 空、实心钢管混凝土构件抗扭抗剪性能的研究 I:刚度和模量的研究[J]. 建筑钢结构进展,2012,14(3):1-7.
- [8] JIANGUO NIE, YUHANG WANG, JIANSHEG FAN. Experimental study on seismic behavior of concrete filled steel tube columns under pure torsion and compression-torsion cyclic load[J]. Journal of Constructional Steel Research,2012,79(12):115-126.
- [9] 范志杰. 圆中空夹层钢管混凝土柱在压弯扭复合受力状态下的试验及理论研究[D]. 南昌:华东交通大学,2012:18-36.
- [10] 聂建国,王宇航,樊健生. 钢管混凝土柱轴压力-弯矩-扭矩空间复合受力拟静力试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(9):1-11.
- [11] 黄宏,黄斌杰. 圆中空夹层钢管混凝土纯扭构件工作机理研究[J]. 华东交通大学学报,2010,27(6):1-6.

Numerical Simulation of Concrete-filled Double Skin Steel Tube under Compression-Bending-Torsion Loading

Huang Hong, Li Ting, Chen Mengcheng

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

Abstract: Finite element method is adopted to analyze mechanism of the concrete-filled double skin steel tube (CFDST) and concrete-filled steel tube (CFST) members. The outer steel tube of CFDST and CFST members is square hollow section (SHS), and the inner steel tube of CFDST member is circular hollow section (CHS). This study finds that the ultimate bearing capacity of CFDST under combined compression-bending-torsion load is in accordance with CFST, but the ductility of the CFDST is better. The interaction between steel and concrete in the corner is the largest in the cross section. The longitudinal loads born by steel tubes and concrete of CFDST and CFST versus longitudinal strain relationship curves are substantially the same. The torque born by steel tubes of CFDST is more than that of CFST, and the torque borne by sandwiched concrete of CFDST is less than that borne by core concrete of CFST. The concrete bears 26% ~ 33% torque of the member due to the constraint of steel tubes and prevents the buckling of steel tubes.

Key words: CFDST; CFST; compression-bending-torsion; finite element

(上接第6页)

Development of Composite Connection Techniques

Huang Zhichao¹, Chen Weida¹, Cheng Wenyu¹, Xue Shuguang¹, Lai Jiamei²

(1. Key Laboratory for Conveyance and Equipment of the Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Developments of composite joining techniques are explored in this paper. It mainly discusses principles about the composite connection techniques, such as traditional mechanical joint, adhesive joint, stitched joint, Z-pined joint, combined joint and cold rolling riveting. Meanwhile, related factors which influence the performances of joint are introduced and the advantages, disadvantages and applicability of various joints are compared. The results show that mechanical joint is mature and most widely used. Combined joint is the expansion of mechanical joint, with stitched joint and Z-pined joint often used as auxiliary connection, adhesive joint becoming mature gradually. Cold rolling riveting has not been researched fully, so it has broad application prospect in composite joint process. Different joints have the corresponding conditions and requirements, thus the quality of joint performance involves many complex factors.

Key words: composite connection; mechanical joint; adhesive joint; stitched joint