

文章编号: 1673-2049(2006)01-0049-05

# 钢管混凝土的截面形式及其承载力分析

裴万吉<sup>1</sup>, 赵均海<sup>2</sup>, 魏雪英<sup>2</sup>

(1. 中建一局钢结构工程有限公司, 北京 100073; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 针对钢管混凝土快速发展的现状, 介绍了钢管混凝土的圆形截面、矩形截面、中空夹层截面和实心双层截面等形式及受力特点。为了能方便地分析各种截面形式的承载力性能, 对几种截面形式的轴心受压极限承载力用大型有限元软件 ANSYS, 加入不同的混凝土本构关系进行了承载力分析计算, 得到了这些截面形式的钢管混凝土的承载力-位移关系曲线以及应力云图; 并同已有的试验或计算结果进行了比较, 其结果较为吻合。对于钢管混凝土的截面选择和极限承载力的计算有一定的参考意义。

**关键词:** 钢管混凝土; 截面形式; 有限元; 轴心受压

**中图分类号:** TU528.59 **文献标志码:** A

## Analysis of Section Types of Concrete-Filled Steel Tube and Its Load Capacity

PEI Wan-ji<sup>1</sup>, ZHAO Jun-hai<sup>2</sup>, WEI Xue-ying<sup>2</sup>

(1. China Construction First Division Steel Structure Engineering Ltd, Beijing 100073, China;

2. School of Architectural Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

**Abstract:** According to the fast development of concrete-filled steel tube, the loading characteristics for the concrete-filled steel tube with sections of circle, square, hollow sandwich and double skin were introduced. In order to analyze the load capacity of several kinds of section types, the loading of axial compression tests were analyzed with program ANSYS. And different relations of stress-strain were considered. The load-displacement curve and stress nephogram of concrete-filled steel tube were analyzed. The results are accordant with the corresponding literatures. It is important to choose the sections and the load capacity of concrete-filled steel tube.

**Key words:** concrete-filled steel tube; section type; finite element; axial compression

## 0 引言

钢管混凝土是在钢管中填充混凝土而得到的, 由于它具有节省材料、施工进度快、抗震性能好等优点, 已经被广泛应用于实际工程中; 同时, 在钢管混凝土的研究和应用中, 其截面形式也不局限于单纯的圆形和方形, 出现了多种截面形式。笔者对目前

钢管混凝土常用的截面形式进行介绍, 并对其承载力进行分析。

## 1 钢管混凝土常用的截面形式

### 1.1 圆形截面

圆形截面是目前研究钢管混凝土承载力最为充分的截面形式, 已广泛应用于各种土木工程中。文

收稿日期: 2005-10-19

基金项目: 教育部博士学科点基金项目(20040710001); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2003E215)

作者简介: 裴万吉(1978-), 男, 河北唐山人, 工学硕士, E-mail: peiwanji@tom.com。

献[1]~[6]中对圆形截面的钢管混凝土长、短柱的轴压、偏压及抗震性能进行了研究,发现由于钢管与混凝土之间的约束作用,圆形截面钢管混凝土的承载力及变形性能明显优于其他传统的结构构件,并且能够克服高强混凝土脆性大的缺点。圆形截面的钢管混凝土构件多用作轴压和小偏压构件。在大偏压作用下,混凝土三向受压的优越性得不到体现<sup>[7-9]</sup>。

## 1.2 矩形截面

圆形截面具有良好的力学性能,但对节点的施工还很难做到经济性与简易性共存,并影响到建筑物的外观和使用。为了改善圆形截面钢管混凝土节点处理较为复杂的缺点,可将圆钢管换成方钢管,方钢管与其他构件的交贯线在一个平面内,便于施工,但对方钢管是否对核心混凝土存在着约束作用还存在着分歧。图1为方钢管混凝土柱试件受压后的形状,由图1可以看出:方钢管对核心混凝土存在着一定的约束作用,但约束主要集中在4个角上。

## 1.3 中空夹层截面

当钢管混凝土构件的长细比或荷载偏心率较大时,其承载力将由截面的抗弯刚度控制,而截面靠近形心部位的材料并不能提供太多的抗弯刚度<sup>[10]</sup>,因此可以去掉这一部分材料,于是出现了一种中空夹层钢管混凝土的截面形式,如图2所示。

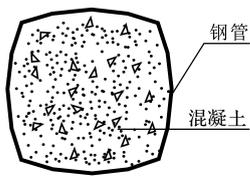


图1 方钢管混凝土受压后的形状

Fig.1 Shape of Concrete-Filled Square Steel Tube Under Loading

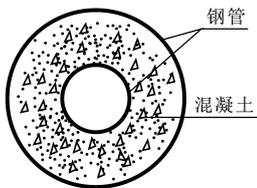


图2 中空夹层钢管混凝土

Fig.2 Concrete-Filled Hollow Sandwich Steel Tube

文献[11]、[12]中对中空夹层钢管混凝土的同心圆截面形式进行了试验及理论分析后认为:①在加荷初期,混凝土与内管之间就存在压力,这种压力延缓了内管的屈曲;②随着荷载的增加,这种压力不断降低,是可忽略不计的;③在钢管屈服之前,外管对混凝土的约束是可忽略不计的,在钢管屈服后,钢管对混凝土的约束作用显著增强,直到整个试件达到最大承载力。当外层钢管为方钢管时,中空夹层钢管混凝土截面形式就成为中国研究者的主要研究对象<sup>[13]</sup>,需要注意的是:无论钢管混凝土构件外层的方钢管还是内部的圆钢管对混凝土的约束都不是很明

显,因此其适用性有必要在设计前进行认真的评估。

## 1.4 实心双层截面

当构件主要受轴压或小偏压作用,且考虑节点处理时,可采用实心的双层钢管混凝土截面形式。如图3所示<sup>[14]</sup>,外层采用方钢管时,可以方便地进行节点的处理;内管采用圆钢管时,可以充分发挥圆管约束能力较好的优点。蔡绍怀等<sup>[15]</sup>提出了同心圆管的实心双层钢管混凝土柱的截面形式。此截面形式可降低钢管的厚度,从而降低厚壁钢管应力不均匀对构件承载力产生的不利影响,同时还能提高其耐火安全性。

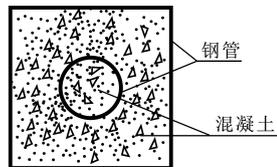


图3 实心双层钢管混凝土

Fig.3 Concrete-Filled Double Skin Steel Tube with Solid

除上述提及的几种截面形式外,还有其他的截面形式,如多边形截面形式<sup>[16]</sup>等,但因为其施工复杂而又无比较明显的力学性能上的优势,因而较少应用。总之,在一个结构体系中,构件受力往往比较复杂,因此有必要根据实际情况选择合理的截面形式。

## 2 钢管混凝土承载力

如第1节所述,各种截面形式都有各自的特点,因此有必要对钢管混凝土几种截面形式的承载力性能进行综合分析比较,从而能够针对不同的工程采取合适的截面形式。在构件的各种参数(含钢率、长细比、钢材与混凝土的强度等级等)已经给出的情况下,可以利用各自的承载力计算公式进行分析比较;然而,在不断改变参数的情况下,这种工作显得特别繁重,即通用性差。随着有限元的发展,一些大型有限元计算程序开始应用在结构的计算中,并且计算结果较为准确,因此笔者利用 ANSYS 软件对几种截面形式的轴压承载力进行分析。在利用 ANSYS 软件建立有限元模型时,钢管采用 Solid45 单元和 Von Mises 屈服准则;混凝土采用 Solid65 单元和 W-W 破坏准则,同时在计算中关闭了混凝土的压碎功能。

### 2.1 圆钢管混凝土柱

构件尺寸及试验数据采用文献[6]中的数据,见表1。因为在柱的承载力试验中并不是直接给柱加载,而是在柱的两端各设置一块垫板,因此在建立有限元模型时,在柱的两端设置了两块垫板,垫板为具有较大弹性模量且只有弹性阶段的金属材料,这可

以有效地解决混凝土支座处的应力集中问题;同时考虑模型的几何对称和荷载对称,在建模时只建立了 1/4 模型。在笔者建立的有限元模型中,单元总数为 768,节点总数为 1 050。钢材按理想弹塑性本构关系考虑,  $f_y=328.95$  MPa,  $f_{cu}=36.4$  MPa。混凝土的本构关系采用文献[16]中的本构关系。

表 1 圆钢管混凝土柱计算值和试验值的比较

Tab. 1 Comparison of Test and Analytical Results for Concrete-Filled Circle Steel Tube

试件	钢管尺寸 $D \times t \times L$ / mm	钢的质 量分 数/%	极限荷载 (文献[7]) $P_0$ /kN	极限荷载 (本文) $P$ /kN	相对 误差/ %
G1-1	90×1.0×300	4.40	348.8	322.3	7.6
G1-2	90×1.0×300	4.40	341.9		5.7
G1-3	90×1.0×300	4.40	346.5		7.0
G2-1	90×1.2×300	5.26	358.1	340.7	4.9
G2-2	90×1.2×300	5.26	351.2		3.0
G2-3	90×1.2×300	5.26	360.5		5.5
G3-1	90×1.5×300	6.55	390.7	359.4	8.0
G3-2	90×1.5×300	6.55	390.7		8.0
G3-3	90×1.5×300	6.55	381.4		5.8

注:  $D$  为钢管直径;  $t$  为钢管壁厚;  $L$  为钢管长度; 表 2、3 同。

图 4 为柱临近破坏时的单元应力云。由图 4 可以看出:在混凝土范围内,应力分布比较均匀,相差不大。这充分体现了圆形钢管对混凝土的约束性能良好的特点,不过,在垫板与混凝土交界处出现了应力不连续的现象,这主要是因为

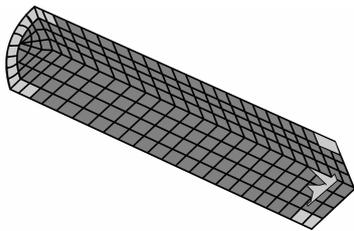


图 4 圆钢管混凝土柱的单元应力云

Fig. 4 Nephogram of Stress of Elements for Concrete-Filled Circle Steel Tube

在建模时将垫板与柱作为一整体考虑,忽略了两者的相对滑移,从而产生了应力集中。由计算结果可以看出:这种应力集中对柱的整体承载力的影响可以忽略不计。图 5 为试件 G1-1 的荷载-位移关系,由图 5 可以看出:试验值与计算值基本吻合。

## 2.2 方钢管混凝土柱

构件尺寸及试验数据采用文献[17]中的部分数据,见表 2。钢材按理想弹塑性本构关系考虑,混凝土的本构关系采用文献[13]中的本构关系。有限元模型仍取 1/4 模型,单元总数为 528,节点总数为 782。通过对极限承载力的试验值和计算值的分析

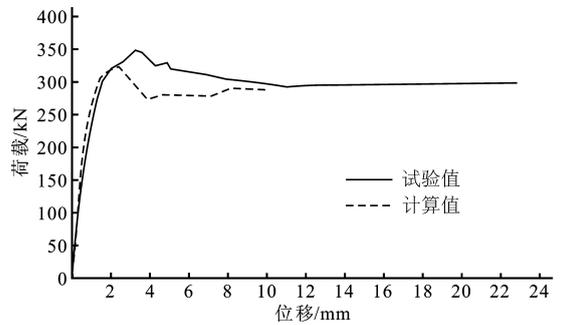


图 5 G1-1 的荷载-位移关系

Fig. 5 Relation of Loads and Displacement for G1-1

比较后可以发现:计算值与试验值的较小值比较吻合,但同试验值的较大值相比,存在着较大的误差。不过,这种误差是偏于保守的,产生的原因为:①方钢管对内部混凝土的约束相对圆钢管来说比较复杂,使得建立的方钢管内约束混凝土本构方程的理论依据并不是很充分,因此基于这种本构方程的有限元计算程序的计算结果就不可避免地存在着较大的误差;②由试验得到的极限荷载可以看出,由于组成构件材料非线性特点,使得试验结果存在着很大的离散性。

图 6 为极限荷载时将 1/4 模型补全为整体模型时的钢管单元应力云,从图 6 中可以发现:①方形截面钢管混凝土柱的破坏是由局部屈曲引起的,在屈曲部位附近,钢管的单元应力比较大,尤其是在钢管的 4 个角上,应力达到了屈服;②在远离屈曲的部位应力比较小,甚至还处于弹性段。这也反映了方形截面钢管混凝土的约束主要集中在 4 个角上。

## 2.3 实心双层钢管混凝土柱

构件尺寸及试验数据采用文献[14]中的两根轴压构件的数据,见表 3。因为两根试件的长细比  $L/D$  接近或大于 4,所以文献[17]中通过对轴压构件设置偏心率(试件计算长度的 1/1 000)考虑长细比对构件承载力的影响,但是在 ANSYS 软件计算中,为了使计算易于收敛,仍然按轴压构件进行计算。计算结果同文献[14]中的计算结果相比偏大,至于哪一个更符合实际,还需要试验数据来验证。

图 7 为构件达到极限承载力的单元节点应力云。1/4 有限元模型单元总数为 1 586,节点总数为 2 001。由图 7 可以看出:构件的破坏仍然是由局部屈曲引起的;内、外两根钢管在屈曲部位的走向基本一致;外层混凝土表现为方形钢管约束下的混凝土的性能,约束不均匀,相比之下,内层混凝土要相对均匀一些。

表2 方钢管混凝土柱计算值和试验值的比较

Tab. 2 Comparison of Test and Analytical Results for Concrete-Filled Square Steel Tube

试件	钢管尺寸 $B \times t \times L /$ mm	钢的质量 分数/%	钢材屈服强度 $f_y / \text{MPa}$	混凝土立方强度 $f_{cu} / \text{MPa}$	极限荷载(文献[5]) $P_0 / \text{kN}$	极限荷载(本文) $P / \text{kN}$	相对 误差/%
G1-1	100×2.0×300	7.80	284.60	42.6	588.0	596.4	-1.1
G1-2	100×2.0×300	7.80			656.6		6.1
G1-3	100×2.0×300	7.80			745.0		20.0
G2-1	100×3.0×400	11.64	388.23	42.6	891.0	804.0	9.8
G2-2	100×3.0×400	11.64			833.0		3.5
G2-3	100×3.0×400	11.64			872.0		7.9
G3-1	100×4.0×300	15.36	239.80	42.6	1 019.0	924.6	7.4
G3-2	100×4.0×300	15.36			980.0		5.6
G3-3	100×4.0×300	15.36			882.0		-4.8

注:  $B$  为方钢管边长; 表 3 同。

表3 双层钢管混凝土柱计算值和试验值的比较

Tab. 3 Comparison of Test and Analytical Results for Double Concrete-Filled Steel Tube

试件	外管尺寸 $B \times t \times L /$ mm	内管尺寸 $D \times t \times L /$ mm	极限荷载(文献[17]) $P_0 / \text{kN}$	极限荷载(本文) $P / \text{kN}$	相对 误差/%
G1	151×3.0×600	50×3.0×600	1 510	1 545	2.3
G2	151×4.4×900	50×3.0×900	1 608	1 627	1.2

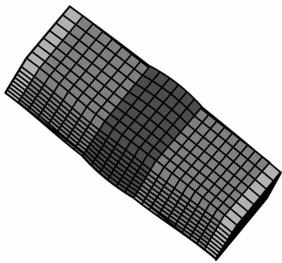


图6 方钢管混凝土柱的  
单元应力云

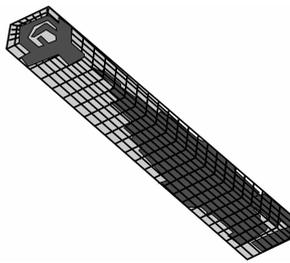


图7 外方内圆实心双层钢  
管混凝土柱的单元应力云

Fig. 6 Nephogram of Stress Elements for Concrete-Filled Square Steel Tube  
Fig. 7 Nephogram of Stress Elements for Double Concrete-Filled Multibarrel Steel Tube

### 3 结语

(1) 因为圆形钢管对混凝土的约束性能比较好, 所以圆形截面钢管混凝土的有限元模型容易建立, 对其承载力的计算也较容易, 但是, 对方形截面钢管混凝土轴压构件承载力的计算, 则相对困难一些, 这主要体现在方钢管对核心混凝土约束的不均匀性和不确定性上。

(2) 由于模拟钢管与混凝土之间的粘结与滑移存在着一定的困难, 产生了一些误差, 并且有的误差还偏大, 但都是偏于安全的, 所以, ANSYS 软件仍能够在一定程度上计算钢管混凝土的轴压承载力, 能为钢管混凝土轴压构件的设计与施工做一些参考指导工作。

### 参考文献:

#### References:

- [1] KENJI S, HIROYUKI N, SHOSUKE M, et al. Behavior of Centrally Loaded Concrete-Filled Steel-Tube Short Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 180-188.
- [2] HU H, ASCE M, HUANG C, WU M, et al. Nonlinear Analysis of Axially Loaded Concrete-Filled Tube Columns with Confinement Effect [J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129(10): 1 322-1 329.
- [3] AMIR F, FRANK S Q, SAMI R. Concrete-Filled Steel Tubes Subjected to Axial Compression and Lateral Cyclic Loads[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(4): 631-640.
- [4] 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
CAI Shao-huai. Modern Concrete-Filled Steel Tube Structure[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [5] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
HAN Lin-hai. Concrete-Filled Steel Tube Structure [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [6] 赵均海. 强度理论及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
ZHAO Jun-hai. Intension Theory and Its Engineering Application[M]. Beijing: Science Press, 2003.

- [7] 韩林海. 钢管高强混凝土压弯构件力学性能研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, 30(5): 24-29.  
HAN Lin-hai. Researches for the Behavior of High Strength Concrete Filled Steel Tubular Compression-Bending Members[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1997, 30(5): 24-29.
- [8] 聂建国, 秦凯, 张桂标. 方钢管混凝土柱内隔板式节点的抗弯承载力研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 42-49.  
NIE Jian-guo, QIN Kai, ZHANG Gui-biao. Experimental Research and Theoretical Analysis on Flexural Capacity of Connections for Concrete-Filled Steel Square Tubular Columns with Inner Diaphragms[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 42-49.
- [9] 赵均海, 郭红香, 魏雪英. 圆中空夹层钢管混凝土柱承载力研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(1): 50-54.  
ZHAO Jun-hai, GUO Hong-xiang, WEI Xue-ying. Research on Bearing Capacity of Concrete Filled Double Skin Steel Tubes Column[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(1): 50-54.
- [10] 黄宏. 方中空夹层钢管轴压力学性能的理论分析[J]. 华东交通大学学报, 2003, 20(2): 19-21.  
HUANG Hong. Analysis on the Behavior of Concrete Filled Double Skin Steel Tubes(SHS Outer and SHS Inner) Subjected to Axial Compression[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2003, 20(2): 19-21.
- [11] WEI S, MAU S T, VIPULANANDAN C, et al. Performance of New Sandwich Tube Under Axial Loading: Experiment[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(12): 1 806-1 814.
- [12] WEI S, MAU S T, VIPULANANDAN C, et al. Performance of New Sandwich Tube Under Axial Loading; Analysis[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(12): 1 814-1 821.
- [13] 陶忠, 韩林海, 黄宏. 方中空夹层钢管混凝土偏心受压柱力学性能的研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2): 33-51.  
TAO Zhong, HAN Lin-hai, HUANG Hong. Concrete-Filled Double Skin Steel Tubular Column with Square Section Under Eccentric Loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(2): 33-51.
- [14] 吕天启, 赵国藩. 内(圆)钢管增强方钢管混凝土偏压柱极限承载力分析数值方法[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(5): 612-616.  
LU Tian-qi, ZHAO Guo-fan. Numerical Method for Analysis of Ultimate Strength of Concrete-Filled Square Steel Tubular Columns Under Eccentric Compression Reinforced by Inner Circular Steel Tube[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2001, 41(5): 612-616.
- [15] 蔡绍怀, 焦占栓. 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.  
CAI Shao-huai, JIAO Zhan-shuan. Behavior and Ultimate Load Analysis of Multibarrel Tube-Confined Concrete Columns[J]. Journal of Building Structures, 1997, 18(6): 20-25.
- [16] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
ZHONG Shan-tong. Concrete-Filled Steel Tube Structure[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [17] 周明. 方钢管混凝土构件力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.  
ZHOU Ming. Mechanical Behavior Research on Square Steel Tube Confined Concrete[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000.

## “第一届结构抗爆炸冲击分析与设计国际会议”会议

“第一届结构抗爆炸冲击分析与设计国际会议”将于 2006 年 9 月 15 日至 9 月 17 日在天津召开。本次会议由天津大学建筑工程学院、西澳大利亚大学土木与资源工程学院主办, 由中国国家自然科学基金委员会资助。本次会议的论文集将由《天津大学学报(英文版)》(Transactions of Tianjin University)以增刊的形式出版, 并将提交 Ei 检索, 论文全文收稿截止日期为 2006 年 6 月 15 日。

E-mail: litian\_1@eyou.com

电话: +86 22 2740 2397

E-mail: xzhou@civil.uwa.edu.au

电话: +61 8 6488 7225