

文章编号: 1005—0523(2006)05—0016—04

方中空夹层钢管混凝土轴压柱承载力有限元分析

张元凯, 陈梦成, 张安哥

(华东交通大学 土木建筑工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:深入研究方中空夹层钢管混凝土构件的力学性能是该类结构的基础. 文章结合已有文献中方中空夹层钢管混凝土柱的轴压试验, 采用 ANSYS 软件分析钢管混凝土轴压构件, 混凝土采用考虑钢管约束效应的本构关系, 钢材采用双线性随动强化模型, 采用 ANSYS (APDL) 编制命令流, 并结合数值对方中空夹层钢管混凝土轴压柱的荷载—变形关系的分析. 显示 ANSYS 计算结果和试验结果以及数值计算吻合较好.

关 键 词:方中空夹层钢管混凝土柱; 非线性有限元分析; 荷载—位移曲线

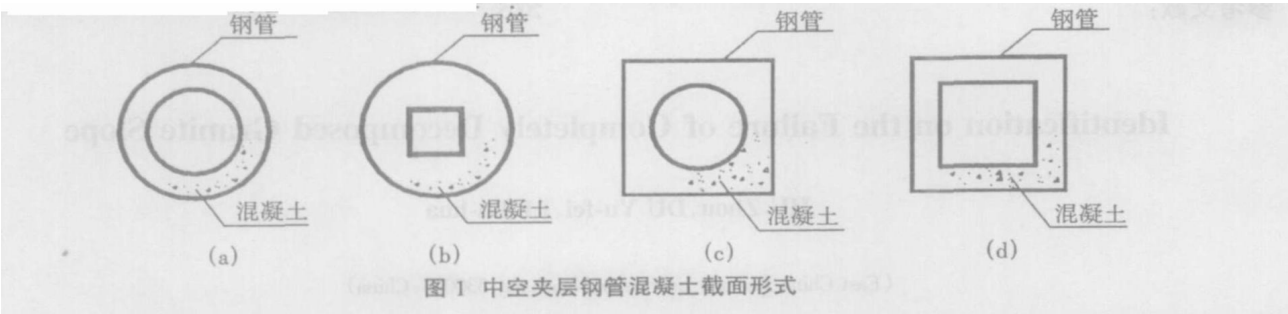
中图分类号: TU375

文献标识码: A

1 前言

钢管混凝土是由钢和混凝土两种材料组成, 是指在钢管内填充混凝土而形成的构件. 它利用钢管和混凝土两种材料在受力时相互间的组合作用, 充分发挥两种材料的优点, 使其具有承载力高、塑性和韧性好、耐火性能好以及施工方便等一系列的优点. 在 60 年代以后, 随着对钢管混凝土力学性能研究的深入, 这类结构被大范围推广应用. 到目前为止已被广泛应用于国内外的拱桥、地铁、高层建筑和工业厂房等结构中, 并取得了良好的经济效益和建筑效果^[1].

90 年代初国外的一些学者开始研究一种新型的钢管混凝土: 中空夹层钢管混凝土 (Concrete Filled Double Skin Steel Tubes), 简称为 CFDST, 即在两个同心放置的钢管之间灌注混凝土而成的构件, 这种构件既保持了钢管混凝土基本优点, 又具有截面开展、自重轻的特点. 变换内外管的截面形式, 中空夹层钢管混凝土可以有多种截面形式, 图 1 所示的为目前研究较多的几种形式. 图 1(a)、(b) 所示中空夹层钢管混凝土统称为圆中空夹层钢管混凝土, 图 1(c) 所示的称为复式钢管混凝土, 图 1(d) 所示称为方中空夹层钢管混凝土. 本文要研究的是图 1(d) 所示的方中空夹层钢管混凝土.



和实心钢管混凝土相比, 中空夹层钢管混凝土构件具有截面开展、抗弯刚度大、自重轻和防火性能好等特点, 具有很好的工程应用前景. 国内外学者近十年来先后开展了一些关于中空夹层钢管混凝土构件力学性能的研究工作^[2]. S. Wei^[3]等研究了如图 1(a) 截面形式轴压短试件的力学性能,

Elchalakani^[4]进行了 8 个如图 1(b) 截面形式轴压短试件的试验研究, Zhao 和 Raphael Gzebieta^[5]进行了如图 1(d) 截面形式的 8 个方套方夹层钢管混凝土短柱的试验研究, 国内近几年也对中空夹层钢管混凝土做了研究, 福州大学的韩林海所在的课题组对如图 1(a)、(c) 截面形式做了系统的研究.

收稿日期: 2006—05—25

作者简介: 张元凯 (1980—), 男, 江苏盐城人, 华东交通大学在读研究生, 研究方向: 钢—混凝土组合结构.

本文拟采用大型通用有限元软件 ANSYS 对图 1(d)所示的方中空夹层钢管混凝土进行了非线性有限元分析. 计算结果同文献^[5]中的试验结果以及文献^[6]中的数值解吻合良好.

2 材料非线性应力应变关系

2.1 钢材的应力应变关系

对于方中空夹层钢管混凝土引入名义含钢率的概念, 即名义含钢率 $\alpha_0 = A_{s1} / A_{co}$, A_{s1} 为外钢管面积, A_{co} 外钢管内径所包围的面积, 我们通常所采用的方中空夹层钢管混凝土构件的名义含钢率 α_0 都在 0.05~0.20 的范围内, 为了计算简便, 本文假设方中空夹层钢管混凝土中内外钢管材的应力—应变关系均服从单向受力时的应力—应变关系.

在有限元分析中, 钢材采用双线性随动强化模型, 拉伸方向屈服应力的增加将导致压缩方向屈服应力的降低, 对于两个屈服应力之间总存在一个 $2\sigma_y$ 差值, 屈服面的大小不变, 在应力空间中平动.

2.2 核心混凝土的应力应变关系

核心混凝土采用文献^[2]中约束混凝土本构关系, 受压时应力应变模型为式(1):

$$y = 2x - x^2 \quad (x \leq 1)$$
$$y = \frac{x}{\beta(x-1)^\eta + x} \quad (x > 1)$$

其中 $x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}, y = \frac{\sigma}{\sigma_0}$

$$\sigma_0 = [1 + (-0.0135 \zeta^2 + 0.1 \zeta) (\frac{24}{f_c})^{0.45}] f_c, \epsilon_0 = \epsilon_{\alpha} + [1330$$
$$+ 760 (\frac{f_c}{24} - 1)] \zeta^{0.2} (\mu\epsilon)$$
$$\epsilon_{\alpha} = 1300 + 12.5 f_c (\mu\epsilon), \eta = 1.6 + 1.5/x, \beta =$$

$$\left\{ \begin{aligned} &\frac{f_c^{0.1}}{1.35 \sqrt{1+\zeta}} (\zeta \leq 3.0) \\ &\frac{f_c^{0.1}}{1.35 \sqrt{1+\zeta(\zeta-2)^2}} (\zeta > 3.0) \end{aligned} \right.$$

其中 f_c 为混凝土轴心抗压强度, $\zeta = \frac{A_s}{A_c} \times \frac{f_y}{f_{ck}}$ 其中 A_s 为钢管截面面积, A_c 为混凝土截面面积, f_y 为钢管屈服强度, f_{ck} 为混凝土轴心抗压强度标准值.

3 轴心受压短柱的有限元分析

方中空夹层钢管混凝土在实际结构中经常被用作轴心受压柱, 因此, 深入认识这类构件的工作机理及力学性能是十分重要的. 对于本文研究的方中空夹层钢管混凝土, 其方形外管有利于梁柱节点的处理, 且内管不易发生局部屈曲, 鉴于此种截面形式的这些优点, 有必要对其轴心受压以及压弯构件的荷载—变形关系进行分析, 利用 ANSYS 进行分析并和现有的试验资料以及数值分析进行比较, 以验证所用方法的正确性和效果. 本文选取文献^[5]中的 8 个方套方夹层钢管混凝土短柱一样的截面参数和材料参数来分析, 试件内外管均采用冷弯薄壁型钢. 外管的宽厚比由 16.7—25.0, 内管宽厚比为 20. 混凝土试件用的是 100mm×200mm 的非标准圆柱体试件, 28 天的实测强度为 58.7 Mpa. 根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2002)中的方法将其换算为标准试件的强度的 $f_c = 55.8 \text{ Mpa}$.

下表 1 中给出了本文中的有限元和文献^[6]中数值计算以及文献^[5]的试验结果, 从表中可以看出, 结果吻合较好. N_e/N_c 的平均值为 0.916, 均方差为 0.053, N_e/N_j 的为 0.919, 均方差为 0.046.

表 1 轴压短柱一览表

试件 编号	$B_1 \times t_1$ (mm)	f_{y1} (N/mm ²)	试验 N_e (KN)[5]	数值计算 N_c (KN)[6]	有限元计算 N_j (KN)	N_e/N_c	N_e/N_j
1A	99.74×5.97	485	1545	1634.1	1634.1	1633.9	0.945
1B	99.74×5.97	485	1614	1634.1	1633.9	0.988	0.988
2A	100.49×4.01	445	1194	1280.9	1278.7	0.932	0.934
2B	100.49×4.01	445	1210	1280.9	1278.7	0.945	0.946
3A	100.18×2.94	464	1027	1135.4	1135.2	0.905	0.905
3B	100.18×2.94	464	1060	1135.4	1135.2	0.934	0.934
4A	100.46×2.06	453	820	988.7	977	0.829	0.839
4B	100.46×2.06	453	839	988.7	977	0.849	0.858

备注: 内管尺寸为 50×50×2.44 mm, 屈服强度为 477 MPa.

3.1 有限元模型的建立

利用 ANSYS 对钢管混凝土构件进行弹塑性分析, 到目前为止大概有以下两种思路:

- 1) 混凝土采用素混凝土本构关系, 钢管对于核心混凝土的约束作用通过接触单元来实现 (即在钢单元与混凝土
- 2) 混凝土采用约束混凝土的本构关系, 钢管对混凝土的约束作用在混凝土本构关系中定义. 目前大多数研究者

单元之间加入滑移单元或间歇单元) 比较困难, 且有研究表明考虑界面之间的粘结滑移性能对钢管混凝土结构的影响很小.

的约束作用在混凝土本构关系中定义. 目前大多数研究者

(例如 Neogi, Tomii, Shakir — Khalil 和 Zeghiche) 在分析钢管混凝土都采用这一假定. 同济大学余勇博士对方钢管混凝土短柱研究时也是采用这一假定^[7], 且取的比较合理的结果.

在本文的模拟中采用后者的方法, 做如下假定:

1) 钢管与混凝土之间完全粘结, 钢管与混凝土整体变形协调.

2) 由于内钢管对混凝土的支撑作用, 中空夹层钢管混凝土与具有相同外钢管的实心钢管混凝土其二者的核心混凝土所受的约束作用相同;

3) 考虑钢材的强化效应, 采用双线性随动强化模型.

4) 混凝土的应力—应变关系采用韩林海书^[2]中给出的约束混凝土的本构关系, 按照式(1)确定.

大量的工程实践和试验研究表明以上假设是可行的. 采用计算机对研究对象进行有限元分析是对传统的理论分析和试验方法的必要补充. 采用计算机进行有限元分析能够解决传统方法无法解决的问题, 有限元分析中的数值显示技术和图象技术, 可以提供结构行为全过程的完整的数据和图形, 非常直观.

3.2 单元选取与网格划分

本文选取 Beam188 梁单元来进行方中空夹层钢管混凝土柱的弹塑性分析. Beam188 单元适合于分析从细长到中等粗短的梁结构. 该单元基于铁木辛哥梁结构理论, 并考虑了剪切变形的影响. 且 Beam188 是三维线性(2 节点)或者二次梁单元. 每个节点有六个或者七个自由度, 自由度的个数取决于 KEYOPT(1) 的值. 当 KEYOPT(1)=0(缺省)时, 每个节点有六个自由度; 节点坐标系的 x, y, z 方向的平动和绕 x, y, z 轴的转动. 当 KEYOPT(1)=1 时, 每个节点有七个自由度, 这时引入了第七个自由度(横截面的翘曲). 这个单元非常适合线性、大角度转动和非线性大应变问题.

Beam188 可以采用 sectype、secddata、secoffset、secwrite 及 se-cread 定义横截面. 并支持弹性、蠕变及塑性模型(不考虑横截面子模型). 这种单元类型的截面可以是不同材料组成的组合截面. 因此 Beam188 单元适用于分析方中空夹层钢管混凝土柱结构.

本文利用 ANSYS 对方钢管混凝土柱进行分析, 计算时将柱划分为 20 个单元, 采用自定义截面在界面上分别定义钢材和混凝土的材料属性.

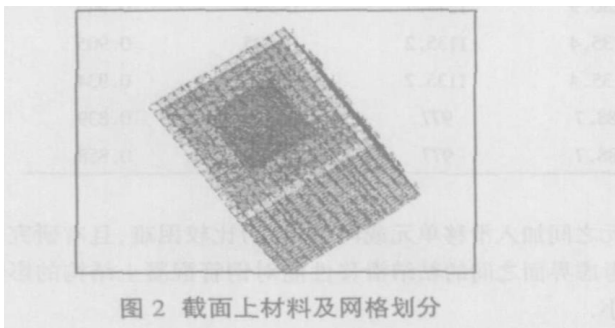


图 2 截面上材料及网格划分

3.3 非线性求解

在计算时, 加载方式通常有两种: 一种是力加载法, 一种

是位移加载法. 在本文选取的文献的实验中, 钢管混凝土短柱是通过承压板间接受力的, 因为钢管和混凝土的弹性模量是不一样的, 所以, 纵向的位移协调必须通过承压板来完成. 在 ANSYS 分析中短柱加载端取为自由端, 另一端为固定端. 本文对所有模型均采用位移加载, 其原因是: 采用力加载法在接近峰值时会遇到很大的收敛问题, 且很难求出下降段, 而本文是研究方中空夹层钢管混凝土柱的受力全过程分析, 如果无法求出下降段, 将无法研究其延性. 所以采用位移加载法, 可以有效的求出钢管混凝土短柱的受力过程的下降段, 并研究其延性.

ANSYS 进行求解时^[8], 采用大变形静态分析, 初分为 100 个步, 采用自动时间步长, 每次最大迭代次数按照 ANSYS 默认值, 以位移作为收敛准则, 当达到最大迭代次数还没收敛将停止计算. 计算结果表明不需要 100 步计算就完成. 上表 1 中给出了各个构件的有限元计算结果值, 结果表明和试验值、数值计算值相差不大. 图 3—图 6 分别是 ANSYS 计算的 4 个构件的荷载—纵向应变全过程曲线.

4 结论及分析

通过对文献^[5]中方中空夹层钢管混凝土柱的力学性能的理论分析得到如下结论:

1) 利用上述数值计算方法, 对文献^[5]中方中空夹层钢管混凝土(内管为方钢管)进行了荷载—应变全过程计算, 各试件承载力的数值计算结果与试验值的比较见表 1, 理论与试验结果符合较好; 并利用有限元软件 ANSYS8.1 分析, 结果(图 3—图 6)表明有限元结果与试验结果、数值计算结果相差不大, 能较好的模拟钢管混凝土轴压的全过程, 验证了有限元模型中采用的本构关系、破坏准则等的正确性, 说明了利用有限元软件分析钢管混凝土构件的可行性和可信性.

2) 套箍系数 ζ 对方中空夹层钢管混凝土的延性有比较大的影响, 从文中图 3—图 6 可以看出图 3(ζ 为 3.156)后期的承载能力很强, 随着套箍系数的逐渐降低; 图 4(ζ 为 1.804); 图 5(ζ 为 1.337); 图 6(ζ 为 0.886)曲线的下降段越大越陡, 表明延性越差, 因此增大套箍系数 ζ , 对构件的延性增加很有利.

3) 对于方中空夹层钢管混凝土柱, 当名义含钢率(比较大时, 钢管的外凸将不是很明显. 从文中分析可以看出, 对截面宽度、高度不变的情况下, 随着名义含钢率(的增大, 构件的承载能力逐渐增加. 因为名义含钢率 α_s 的增大, 相当于增大钢材的比例, 因为钢材的强度比混凝土的强度大的多, 因此增大名义含钢率(必然可以增大构件的承载能力).

4) 本文 ANSYS 分析选用的是 Beam188 单元, 从总体上来说, 是比较成功的, 但从表 1 中计算结果可以看出计算值比试验值偏大, 这主要是由于用 Beam188 单元分析时没有考虑钢管与混凝土之间的滑移动和相互分离, 这相当于将构件的刚度考虑的过大, 还有就是本文选用的约束混凝土的本构关系是方形实心的本构关系, 从 ANSYS 计算结果偏大可以

分析方中空钢管混凝土钢管对混凝土的约束要小于方实心钢管对混凝土的约束,正是以上这两点作用导致计算值比

试验值偏大.

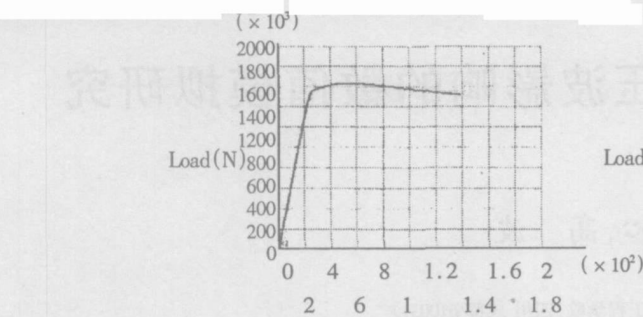


图 3 Strain

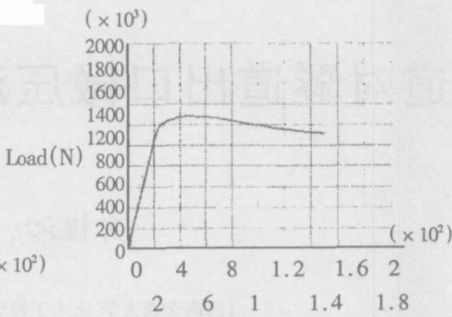


图 4 Strain

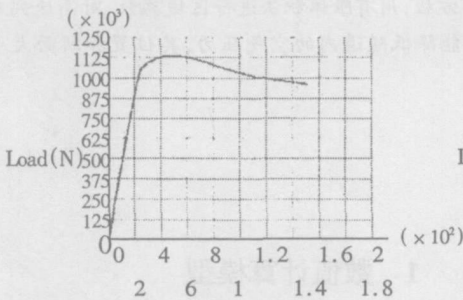


图 5 Strain

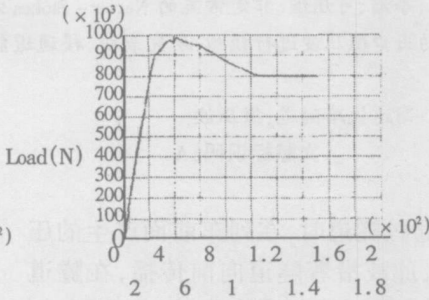


图 6 Strain

5) 在有限元分析中,未考虑钢材与混凝土之间滑移的影响和方中空钢管混凝土中钢管对混凝土的约束比实心要有所减弱的影响,还有待进一步的研究.

参考文献:

[1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M](第 3 版). 北京:清华大学出版社,2003.
[2] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京:科学出版社,2004
[3] S WEI, S T MAU, C VIPULANANDAN, S K MANTRALA. Performance of New Sandwich Tube under Axial Loading: Analysis[J]. Journal of Structural Engineering. 1995, 121 (12): 1815—1821.

[4] Elchalakani M, Zhao Xiao Ling, Gzebieta R. 2002. Tests On Concrete Filled Double Skin (Chs Outer And Shs Inner) Composite Short Columns Under Axial Compression [J]. Thin-Walled Structures, 40(5): 415—441
[5] Xiao-Ling ZHAO, Raphael Gzebieta. 2002. Strength and Ductility of Concrete Filled Double Skin (SHS Inner and SHS Outer) tubes[J]. Thin-Walled Structures. 2002, 40: 199—213.
[6] 谢 力. 矩形中空夹层钢管混凝土力学性能及承载力的研究[D]. 华东交通大学硕士学位论文,2005. 6
[7] 余 勇, 吕西林. 方钢管混凝土柱的三维非线性分析[J]. 地震工程与工程震动 1991, 1(1).

Concrete-filled Double Skin Steel Tubes with Square Section
Axially Compressive Behavior Nonlinear Finite Element analysis

ZHANG Yuan-kai, CHEN Meng-cheng, ZHANG An-ge

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

Abstract: The analysis and research for the concrete-filled double skin steel tubular with square section is the basic of the type structural. The text combines the history data of axial compression experiment about the concrete-filled double skin steel tubular column with square section. In this dissertation, ansys command streams are edited to APDL language. The constitutive equations of the core concrete considering the restraint effect of steel tube is built, and the constitutive equations of the steel is bilinear(BKIN) model. And make use of the number procedure, the finite element analysis result is accord with the experiment result and number procedure.

Key words: concrete filled double skin steel tubular column with square section; nonlinear finite element analysis; load—displacement curve