

文章编号:1671-6833(2003)02-0029-04

# 钢管混凝土受压构件的弹塑性承载力分析

颜全胜<sup>1</sup>, 王 危<sup>1</sup>, 邹巧鸿<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学桥梁工程系, 广东 广州 510640; 2. 河南省南阳市盛华建筑有限公司, 河南 南阳 473000)

**摘 要:** 采用基于纤维模型的分段分块的杆系结构有限元方法, 推导了钢管混凝土压弯构件的弹塑性刚度矩阵, 提出了计算钢管混凝土压弯构件弹塑性稳定承载力的计算模型, 编制了相应的计算程序. 采用提出的方法和程序, 计算了圆管截面的钢管混凝土轴向受压、偏心受压长柱的弹塑性极限承载力, 理论分析结果与文献报道的试验和理论结果吻合良好.

**关键词:** 钢管混凝土; 压弯构件; 极限承载力; 弹塑性分析; 有限元

**中图分类号:** TU 398

**文献标识码:** A

## 0 引言

钢管混凝土构件具有强度高、塑性和韧性好、施工方便快捷以及造价经济合理等优点, 近年来在房屋和桥梁结构中得到广泛的应用<sup>[1,2]</sup>. 钢管混凝土是一种约束混凝土, 利用钢管对混凝土的套箍作用, 可以提高核心混凝土的抗压强度. 钢管混凝土构件通常承受轴向和偏心压力作用, 目前对于钢管混凝土的受力性能研究还有待进一步完善, 尤其是受压长柱的稳定承载力问题一直是工程界普遍关心的问题.

目前国内对于钢管混凝土短柱的抗压极限承载力研究较多, 常用的计算方法有采用极限平衡理论<sup>[3]</sup>、将钢管混凝土构件视为统一材料理论<sup>[4]</sup>、约束混凝土理论<sup>[5]</sup>或双剪统一强度理论<sup>[6]</sup>等. 对于细长柱的轴压和偏压稳定承载力计算方法有<sup>[7]</sup>: ①采用试验数据回归得到的承载力折减系数; ②采用欧拉公式轴压长柱的稳定系数; ③考虑纵向弯曲的影响放大系数法; ④基于统一材料性能指标的相关方程; ⑤基于纤维模型和有限元理论的数值算法等. 由于试验构件数量有限, 考虑参数较少, 采用试验拟合得出受压长柱的稳定承载力计算公式, 其通用性往往受到限制, 而采用纤维模型的数值方法<sup>[7]</sup>, 则可以取得较好的效果. 过去的研究者<sup>[3]</sup>只是考虑了柱子中间截面的平均应变和内外力平衡, 研究了钢管混凝土构件轴压、纯弯

和偏压受力特性和承载力, 这样处理不适用于两端约束条件不同的超静定受压柱或钢管混凝土结构的承载力分析.

本文采用基于纤维模型的“分段分块”杆系结构有限元法, 建立了圆形截面钢管混凝土结构的弹塑性稳定计算模型和方法, 并编制了相应的计算程序. 文中计算了轴心受压、偏心受压钢管混凝土柱的受力破坏全过程曲线, 得出它们的弹塑性承载力, 与文献报道的试验和理论分析结果吻合良好.

## 1 计算模型

### 1.1 基本假设

(1) 构件达到承载力前钢管不发生局部失稳, 钢管和混凝土粘结良好, 两者之间无相对滑移和变形现象;

(2) 加载过程中, 钢管混凝土截面始终保持平面, 钢管形状和面积保持不变;

(3) 外层钢管为理想弹塑性材料, 内包核心混凝土的应力—应变关系为分段多项式.

(4) 忽略剪应力和剪应变对钢材屈服的影响.

### 1.2 应力—应变关系

核心混凝土的应力—应变关系采用文献<sup>[2]</sup>提出的分段多项式表示, 而钢管则认为是理想弹塑性材料.

收稿日期: 2003-03-12; 修订日期: 2003-04-15

**作者简介:** 颜全胜 (1968—), 男, 江西省永新县人, 华南理工大学副教授, 博士, 主要从事大跨度桥梁结构理论方面的研究.

受拉区混凝土应力—应变关系按下式确定<sup>[3]</sup>:

$$\sigma = \sigma_p \left[ 1.2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} - 0.2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^2 \right], (\varepsilon \leq \varepsilon_p) \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_p \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right) \frac{1}{0.51 \sigma_p^2 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} - 1 \right) + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}}, (\varepsilon > \varepsilon_p) \quad (2)$$

式中:  $\sigma_p$  为峰值拉应力,  $\sigma_p = 0.26(1.5f_{ck})^{2/3}$ ;  $\varepsilon_p$  为峰值应力时的应变,  $\varepsilon_p = 43.1\sigma_p$ .

钢管内核心混凝土受压应力—应变关系采用分段多项式表达,其具体表达式为<sup>[3]</sup>:

$$\sigma = \sigma_0 \left[ A \left( \varepsilon / \varepsilon_0 \right) - B \left( \varepsilon / \varepsilon_0 \right)^2 \right], (\varepsilon \leq \varepsilon_0) \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_0 (1 - q) + \sigma_0 q \left( \varepsilon / \varepsilon_0 \right)^{0.1\xi}, (\xi \geq 1.12, \varepsilon > \varepsilon_0) \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_0 \left( \varepsilon / \varepsilon_0 \right) \left[ \beta \left( \varepsilon / \varepsilon_0 - 1 \right)^2 + \left( \varepsilon / \varepsilon_0 \right) \right], (\xi < 1.12, \varepsilon > \varepsilon_0) \quad (5)$$

式中:  $\sigma_0 = f_{ck} [1.194 + (13/f_{ck})^{0.45} (-0.07485\xi^2 + 0.5789\xi)]$ ;  $\varepsilon_0 = 1300.0 + 14.93f_{ck}$ ;  $\varepsilon_0 = \varepsilon_0 + [14000 + 800(f_{ck} - 20)/20]\xi^{0.2}$ ;  $A = 2.0 - k$ ;  $B = 1.0 - k$ ;  $k = 0.1\xi^{0.745}$ ;  $q = k / (0.2 + 0.1\xi)$ ;  $\beta = (2.36 \times 10^{-5}) [0.25 + (\xi - 0.5)^2] f_{ck}^2 \times 5 \times 10^{-4}$ .

钢材为理想弹塑性材料,钢材拉压状态下应力—应变关系相同.根据假设,只考虑截面分块中心的正应力对屈服的影响,则该点的应力由其纵向应变历程决定,截面任一点的广义应力和应变关系<sup>[3]</sup>可写成

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & (|\varepsilon| < |\varepsilon_y|) \\ \sigma_y, & (|\varepsilon_y| \leq |\varepsilon| < |\varepsilon_{pi}|) \\ E(\varepsilon - \varepsilon_{pi}), & (|\varepsilon_{pi}| < |\varepsilon|) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon_y$  为屈服应变;  $\sigma_y$  为屈服应力;  $\varepsilon_{pi}$  为塑性应变;  $\varepsilon$  为应变;  $\sigma$  为应力;  $E$  为弹性模量.

### 1.3 截面划分

根据纤维模型的概念,本文将钢管混凝土拱肋单圆管截面按照图1形式分块.设第*i*块坐标(*y*, *z*),微元面积为 $dA_{y,z}$ .首先根据截面几何中心的轴向应变 $\varepsilon$ 、曲率 $\phi_y, \phi_z$ ,求得截面上设第*i*分块形心处的纵向应变:

$$\varepsilon_{y,z} = \varepsilon + \phi_y y + \phi_z z \quad (7)$$

由材料应力—应变关系,钢管与核心混凝土均可计算出与应变对应的切线模量.然后根据截面分块情况,累计各小块面积对整个截面特性的贡献,可以计算出整个截面的各项刚度系数( $EA, EI_y, EI_z$ 等).

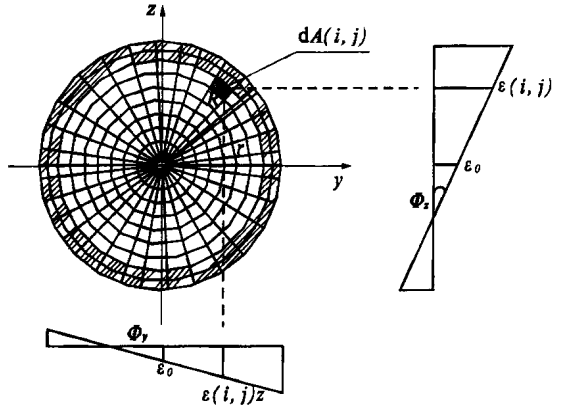


图1 单圆管截面划分图及应变分布

Fig. 1 Division of single circle section and distribution of strain

### 1.4 杆系结构U·L·列式增量平衡方程

考虑结构处于 $T + \Delta T$ 时刻的平衡状态,基于U·L·列式的非线性有限元列式法,可建立杆系结构增量平衡方程为<sup>[3]</sup>:

$$({}^T K + {}^T K_g) \{U_T\} = {}^{T+\Delta T} P - {}^T F \quad (8)$$

式中:左边第一项 ${}^T K$ 为结构弹性或弹塑性刚度矩阵;左边第二项 ${}^T K_g$ 为几何刚度矩阵,也称初应力矩阵,它表示从 $T$ 到 $T + \Delta T$ 时刻的变形过程中, $T$ 时刻连续体已存在的应力对刚度矩阵的影响;右边第一项为 ${}^{T+\Delta T} P$ 为 $T + \Delta T$ 时刻外荷载等效节点力向量;右边第二项为 ${}^T F$ 时刻连续体内的应力引起的等效节点力向量.

对于式(8)的增量平衡方程,一般可采用增量Newton—Raphson迭代法求解.为了加快收敛速度并得出结构从加载开始到极限承载力的全过程曲线,程序中采用弧长控制方法计算,收敛标准是同时要求位移增量和不平衡力都小于给定的精度范围.采用非线性有限元方法,求解从加载开始到失稳全过程杆系结构的响应,得出荷载—位移关系,对应于荷载—位移关系曲线的顶点就是结构弹塑性稳定的极限荷载.

## 2 数值算例

为验证本文建立的分析模型和程序的正确性和有效性,以下分析计算钢管混凝土轴心受压构件、偏心受压构件的弹塑性极限承载力,并与文献[2,9]给出的试验和研究理论结果进行对比.

### 2.1 轴压构件的承载力

文献[2]进行了钢管混凝土轴心受压构件的理论和试验研究,本文计算了其中5个试件的弹

塑性受力全过程. 计算时每个压杆沿轴向划分为20个单元. 各模型试件的参数详见文献[2]. 表1列出了模型构件的极限承载力文献[2]试验值、计算值和本文计算值.

从表1可知, 本文计算的结果与文献[2]的试验和理论值非常接近. 本文计算结果与文献[3]试验值的最大误差为10.5%, 最小误差4.7%, 平均误差5.9%. 图2为其中两构件的荷载—跨中侧向挠度关系曲线.

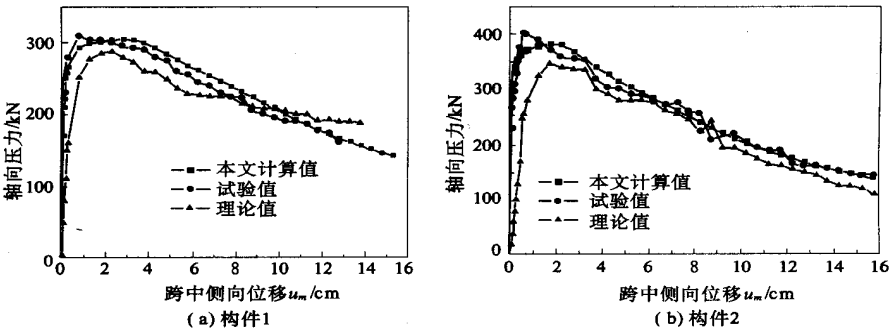


图2 试验模型的荷载—挠度曲线

Fig. 2 Curves of load—deflection at span center of test models

2.2 偏压构件的承载力

文献[9]进行了高强度钢管混凝土偏心受压构件的试验研究, 文献[2]也对它们进行了理论计算. 与轴心杆一样, 本文计算时将钢管混凝土偏心受压构件模型沿轴向划分成20个单元, 详细的构件参数见文献[2, 9]. 表2列出了文献[9]偏心受压构试验结果、文献[2]计算结果和本文的计算结果. 从表2知, 本文计算得出的钢管混凝土偏心受压构件极限承载力与文献试验值的最大误差为13.4%, 最小误差为5.1%, 平均误差为10.4%.

表2 偏压构件的极限承载力

Tab. 2 Ultimate load capacity of column under eccentric compressions					kN
构件 序号	文献[9] 试验值	文献[2] 计算值	本文 计算值	本文结果/ 试验值	
1	2 210	2 139	2 323	1.051	
2	1 580	1 702	1 785	1.130	
3	1 234	1 365	1 399	1.134	
4	820	927	919	1.121	
5	2 090	1 853	1 823	0.872	
6	1 500	1 420	1 412	0.941	
7	1 250	1 148	1 120	0.896	

以上钢管混凝土轴压、偏压构件算例结果表明: 采用本文方法进行钢管混凝土构件极限承载力计算, 得出的承载力与文献报告的试验结果吻合较好. 荷载位移曲线与试验值很接近.

表1 轴压构件的极限承载力

Tab. 1 Ultimate load capacity of column under axial compressions					kN
试件 编号	文献[2] 试验值	文献[2] 理论值	本文理 论值	本文结果/ 试验值	
SC154-2	292	250	276	0.945	
SC154-3	298	250	287	0.963	
SC149-1	318	292	304	0.956	
SC130-1	400	350	381	0.953	
SC130-2	440	350	394	0.895	

3 结束语

通过上述分析, 可以得出结论: 本文的提出的钢管混凝土受压构件的分析方法是正确有效的, 数值分析结果与试验值吻合良好, 计算精度较高. 该方法可用于钢管混凝土拱桥和框架结构的弹塑性分析.

参考文献:

[1] 蔡绍怀. 我国钢管混凝土结构技术的最新进展[J]. 土木工程学报, 1998, 32(4): 16~26.

[2] 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[3] 江见鲸. 混凝土结构工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.

[4] 韩林海. 钢管混凝土力学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1996.

[5] 张克波, 夏桂云, 颜东煌, 等. 钢管混凝土轴心受压承载力计算[J]. 长沙交通学院学报, 2002, 18(2): 47~51.

[6] 赵均海, 顾强, 马淑芳. 基于双剪统一强度理论的轴心受压钢管混凝土承载力的研究[J]. 工程力学, 2002, 19(2): 32~35.

[7] HAJJAR J F, GOURLEY B C. Representation of concrete-filled steel tube cross-section strength[J]. ASCE,

journal of structural engineering, 1989, 122( 11) : 1327~1336.

[ 9] 顾维平,蔡绍怀,冯文林.钢管高强混凝土偏压柱性能和承载能力的研究[J].建筑结构,1993,( 3) :8~12.

[ 8] 颜全胜.大跨度钢斜拉桥极限承载力分析[D].长沙:长沙铁道学院,1994.

Ultimate Load Capacity Analysis for Concrete-filled steel tube Beam-columns

YAN Quan-sheng<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, ZOU Qiao-hong<sup>2</sup>

( 1.Department of Bridge Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640,China ;2.Nanyang Shenghua Construction Co. Ltd.,Nanyang 473000,China)

**Abstract :**In this paper , an approach for the ultimate load analysis of the concrete-filled steel tube ( CFST) beam-column is presented . Based on the fiber model of beam structure , the elastic and elasto-plastic stiffness matrix of the beam-column element are deduced . And a FORTRAN program in which both the geometric and material non-linearity are taken into account , are developed . The elasto-plastic ultimate loads of columns and beam-column models with circular section are computed . The total load-deflection relation curves of columns are obtained . And the results show that the present results agree well with those by the previously experimental and numerical studies .

**Key words :**concrete-filled steel tube beam-column ; ultimate load ; elasto-plastic analysis finite element method

( 上接第 21 页)

Determination and Correlation of Solubility of Cyanuric Acid in Water

REN Bao-zeng , LI Chen , YUAN Xiao-liang , LI Wei-ran , LUO Ting-liang

( College of Chemical Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002,China)

**Abstract :**Solubility of cyanuric acid in water systematically is determined . By Apelblat 's solubility equation correlating , the equation  $\ln x = -474.8025 + \frac{18\,932.9494}{T} + 70.7514 \ln T$  is obtained . The mean relative deviation is 1.28% between the calculated values and the experimental , literature values . Taking temperature as input vector and solubility as output vector to set up radial basis function artificial neural networks , the results indicate that RBF can fast realize convergence approaching a function . The mean relative deviation of train aggregate is 0.81% , and test aggregate is 1.64% . The RBF neural network is suitable for the system of cyanuric-water from 283.15 K to 363.15 K .

**Key words :**cyanuric acid ; RBF artificial neural network ; solubilities ; model