

*Revised Edition*

CONCRETE FILLED STEEL TUBULAR STRUCTURES

# 钢管混凝土结构

(修订版)

钟善桐 著

黑龙江科学技术出版社

(黑)新登字第2号

钢 管 混 凝 土 结 构

---

出 版：黑龙江科学技术出版社  
作 者：钟善桐  
责任编辑：徐晓飞  
封面设计：张秉顺  
印 刷：黑龙江龙新印刷有限公司  
规 格：787×1092 1/16 印张 31.75 字数 635 千字  
版 次：1994年1月第一版  
1994年1月第1次印刷  
印 数：1—2100册  
ISBN 7—5388—2463—4/TG·36  
定 价：18.00元

---

*Revised Edition*

CONCRETE FILLED STEEL TUBULAR STRUCTURES

# 钢管混凝土结构

(修订版)

钟善桐 著

黑龙江科学技术出版社

# 再版前言

本书主要收入作者和研究室同志们多年来从事科研工作的成果。1983年在总结当时科研成果的基础上编成讲义,作为研究生教材,1985年进行过一次补充和修改。同年8月在原哈尔滨建筑工程学院举行的钢管混凝土结构国际学术讨论会上,曾向国内外学者介绍了该书的主要内容,获得好评。为了进一步提高该书质量,推动这种结构在我国的推广和应用,于1987年经过整理后正式出版《钢管混凝土结构》第一版。

作者和研究室的同志们多年来通过大量试验,发现圆管中的混凝土受到圆管的有效约束,在工作性能方面起了质的变化:工作阶段很接近于弹性,破坏时呈现很大的塑性,不但大大提高了承载力,而且极大地增加了塑性变形能力;同时管内混凝土的性能比普通混凝土稳定。因此,由这两种材料组合制成的各种构件的工作性能比较接近于钢构件,而塑性和韧性方面还胜于钢结构。

70年代末80年代初,在大量观察、实验和分析的基础上,作者提出:采用塑性理论或弹性强度理论来确定组合材料的强度设计指标;考虑初始缺陷的影响,采用压溃理论来确定轴心受压构件和偏心受压构件的稳定承载力等。这样,基本上建立起适应这种组合材料性能的偏于理论的计算体系。

自从《钢管混凝土结构》第一版问世以来,深受各方面的重视,对在我国推广这种结构起了一定的作用。目睹采用钢管混凝土的各种新建筑物在祖国各地区、各行业中不断涌现,对作者既是鼓舞,更是鞭策。

众所周知,科学工作者的职责是追求,是探索。只有不断探索,才能克服困难、甚至非议,才能不停滞地前进,也才能深入了解和掌握一种新结构的内在规律。

作者及金属结构研究室的全体同志,在已取得的科研成果的基础上,并没有停止在已到达的层次,而是锲而不舍、孜孜不倦地继续追求,不断探索。经过艰苦的工作,终于探索出研究钢管混凝土结构的一条新路子。这就是:根据大量实验数据,经过深入分析、整理和研究,进而得到符合核心混凝土和钢管在轴心受力时的多轴应力状态下的本构关系。这就为采用有限元法求解各种荷载条件下的构件性能曲线创造了条件,从而顺利地导出钢管混凝土构件轴



心受压、偏心受拉、弯曲、压弯和拉弯等的工作性能关系,及一整套新的设计计算公式。

这种以构件整体工作性能为基础,用构件整体几何特性(面积、惯性矩和抵抗矩等)求解构件内力和应力的方法,不但概念清新,而且计算公式也十分简便。一反以往分别研究钢管和核心混凝土的工作性能,采用承载力叠加的设计方法,因而找出了研究组合结构的新途径和新方法。显然,它将会进一步促进这一结构的发展。

我们的这些新成果从1988年起就不断地向国内外有关学术界作了介绍,并得到了各方面的赞许。于1991年为原能源部《火力发电厂主厂房组合结构设计暂行规定 DLGJ 99-91》以及东北电业管理局辽宁电力勘测设计院《送电线路空心钢管混凝土杆段设计技术规定 DLGJ-S11-92》全部采用。这是对我们工作的肯定和鼓励,使我们获得的科研成果及时地转化为生产力,为国家建设服务。

1993年,在已经取得成果的基础上,又采用了内时理论来描述核心混凝土在复杂应力状态下的本构关系,更全面地解决了运用有限元法求解钢管混凝土在各种荷载作用下的工作性能全曲线,例如压、弯、扭、剪等。据此,率先提出了钢管混凝土的统一理论,把所有的钢管混凝土构件,从单项荷载状态到最复杂的多项荷载状态用一个统一的计算公式来表达其极限状态,这在理论上是一次新的突破,从而使对钢管混凝土的研究又进入了一个新阶段。

总之,我们的科学实践经验使我们深刻而清醒地体会到:在追求科学真理的道路上,每一步都是起点,永远没有终点。

在此,应该指出的是:近年来我们所以能在一些方面得到这些成果,是和多方面的支持和协助分不开的。

首先是国家自然科学基金委员会的资助。从1989年起,作者获得基金会的立项资助,这对从事应用科学基础性研究者是极大的荣誉,同时也是我们开展研究工作的经济保证。这项资助还将持续下去。

同时在研究工作过程中,作者还得到了来自多方面的支持和鼓励,包括横向联系和科研合作,这对我们顺利地完成研究工作起了很大的协助作用。在此谨表深切的谢意。

我们的工作得到了国家自然科学基金委员会鉴定委员会的高度评价,认为:成果丰硕,具有重要的科学价值,研究居当代国际先进水平,已初步形成了一个学派(鉴定证书编号92国科金鉴字第016号)。

为了向国内外及时系统地介绍我们已取得的各项最新成就,促进这一新结构的发展,使之在我国得到更为广泛的推广应用,为建设有中国特色的社会主义尽一份力量,作者全面系统地总结了1994年以前的各项成果,重新编写了本书,以飨读者。

当然,本书得以问世,还得感谢黑龙江科学技术出版社的积极支持,使

这些来之不易的研究成果得以及时地向国内外介绍，发挥抛砖引玉之功。

前面已经提到过，科学研究和实践是永无止境的，今后我们还将在更广大的范围内进行深入的研究和探索。由于水平所限，本书可能还存在着一些问题或缺点，热诚地希望读者提出宝贵意见。

钟善桐

一九九四年十月

## Preface for Revised Edition

The first edition of this book is composed of scientific research results, which have been carried in the author's research group for many years. In 1983 it was used as a teaching notes for postgraduates. A further fulfillment and amendment were accomplished in 1985. The main idea of this book was introduced to national and international researchers when the international conference for concrete filled steel tubular (CFST) structures was held in the university in 1985. The book entitled "Concrete Filled Steel Tubular Structures" was formally published in 1987 in order to promote the application of the structures.

After lots of experiments carried out in the author's group, it was found out that the concrete inside the steel tube was effectively confined by the steel tube. The confinement totally changed the behaviors of this kind of structural elements. The elements behaved approximately as an elastic material under service load, and showed a very large plastic deformation when failure occurred. This not only greatly increased the bearing capacity of the elements, but also the plastic deformation. At the same time, the behaviors of the concrete inside the steel tube became much more stable than those of the normal concrete. Therefore, it was concluded that the behaviors of this kind of structural elements were similar to those of steel ones, but had a better plasticity and ductility.

In late 70's and early 80's, on basis of large number of observation, experiments and analysis, the author suggested that the strength of this kind of composite material should be determined by plastic theory or elastic strength theory. The ultimate load theory should be used to determine the bearing capacity for the members under axial compression with and without bending moment if the initial stress and eccentricity were taken into analytical method, which was suitable for the composite material, was basically set up.

This book had brought many interests to this kind of structures and

played a rather important role for promoting the application of the structures in our country.

It is very exciting to see CFST structures has been widely used in many different kinds of buildings all over the country.

As we know it is necessary to be persistent for scientists to get to know and to master the constitutive law of new structures, in order to overcome all the difficulties and even objection. The research carried out by the author and his research group has never been stopped, even though a lot of success has been achieved. After continuous pursuit and hard work, another new method was found out to analyse CFST structures. On basis of lots of experimental data, the concrete constitutive relationship was obtained. The relation was suitable for the analysis of the concrete within the steel tube. It provided a key factor for analysis of CFST elements under different loading conditions with finite element method. So by finite element method, all the behavior were easy to understand for the members under axial compression with/without bending moment and axial tension with/without bending moment.

The method, used for calculating the internal force and stress of the elements by integrate geometric characters on basis of the integrate working behavior of the elements (for example: area, moment of inertia and section module), is not only easy to understand but also has a very simple calculating formula. It's a new method for research on composite structures and had lots of difference with the earlier research. The earlier one simply add up the bearing capacity of steel tube and concrete after separate analysis on the behavior of the two materials. It's obvious that the new method will play an important role for the development of this structures.

From 1988, many of our new research results were continuously introduced to scientists and arose many interests. In 1991, our results were successfully adopted by « Designing Regulation for Composite Structures Used for the Main Building of Power Plant DLGJ99-91 » published by former Energy and Resource Ministry, and « Designing Regulation for Hollow Members Used for Electric Transmission Poles DLGJ-S11-92 » published by Liaoning Electric Industry Design Institute. The adoption was an award to us. It applied our research into practical work without delay.

In 1993, on base of the research results achieved before, the employment of endochronic theory for concrete inside the steel tube under arbitrary stress states made it possible to understand the behavior of CFST members under different loading conditions by finite element method. The



external load considered included compression, bending moment, torsion and shearing etc. Until then, for the first time, the United Theory for CFST members was suggested.

The theory made it possible to express the bearing capacity of CFST members under any loading conditions with a single formula. This new theoretical breakthrough has pushed the research to a new stage. On the whole, according to our scientific research experience, we understand that there is no end on the road to pursue the scientific truth, everywhere is beginning.

Hereby, it should be mentioned that the success of our research in recent years was supported and assisted by many parties.

Firstly it was financially supported by the National Natural Science Foundation from 1989 and the support will continue. It's not only a great glory for theoretical researches of natural science, but also a financially guarantee for our research work.

Secondly, the support and encouragement from other parties, including our cooperation with companies, have been very helpful for the successful finish of the research work. The author wants to express his acknowledgement to all of them.

Our work was given a very high assessment by the Inspecting Committee of the National Natural Science Foundation. Our inspection certificate says the research has an important scientific value and of international level (certificate No.16 issued by the Inspecting Committee of National Natural Science Foundation in 1992).

The author rewrites this book after systemly put in many research results before 1994, in order to introduce our research to national and international researchers, to promote the development and application of this kind of new structures, and to serve the construction of our country.

The author's acknowledgement also goes to the Heilongjiang Science and Technology PRESS. Their support made it possible for these research results to be introduced to national and international researchers.

As mentioned above, there is no end for scientific research and application, we are going to do further research on a deeper level and broader topics. Any suggestion for the book or our research shall be warmly welcomed!

Zhong Shan - tong

Oct.1994

# 基本符号

## 材料指标

- $E_s$  —— 钢材的弹性模量
- $E_s'$  —— 钢材的切线模量
- $E_s^o$  —— 钢材的割线模量
- $G$  —— 钢材的剪切模量
- $E_c$  —— 混凝土的弹性模量
- $E_c'$  —— 混凝土的切线模量
- $E_c^o$  —— 混凝土的初始切线模量
- $E_c^o$  —— 混凝土的割线模量
- $n_0$  —— 弹性模量比
- $n$  —— 割线模量比
- $\mu_s$  —— 钢材的泊松比
- $\mu_s'$  —— 弹塑性阶段钢材的泊松比
- $\mu_c$  —— 混凝土的泊松比(横向变形系数)
- $f_y$  —— 钢材的屈服点
- $f_u$  —— 钢材的极限强度
- $f_p$  —— 钢材的比例极限
- $f_y^o$  —— 钢材抗剪屈服点
- $f_v$  —— 钢材抗剪强度设计值
- $f$  —— 钢材抗拉、抗压和抗弯强度设计值
- $f_{cu}$  —— 混凝土立方强度(强度等级)
- $f_{ck}$  —— 混凝土的抗压强度标准值
- $f_c$  —— 混凝土轴心抗压强度设计值
- $f_{tk}$  —— 混凝土抗拉强度标准值
- $f_t$  —— 混凝土抗拉强度设计值
- $f_{cmk}$  —— 混凝土弯曲抗压强度标准值
- $f_{opt}$  —— 混凝土标准圆柱体强度
- $E_x$  —— 钢管混凝土组合弹性模量
- $E_x'$  —— 钢管混凝土组合切线模量
- $E_x^o$  —— 钢管混凝土组合割线模量
- $G_x$  —— 钢管混凝土组合剪切模量
- $f_d^o$  —— 钢管混凝土按塑性设计的组合强度标准值
- $f_d$  —— 钢管混凝土按塑性设计的组合强度设计值
- $f_{dk}$  —— 钢管混凝土按弹性设计的组合强度标准值

- $f_d$  —— 钢管混凝土按弹性设计的组合强度设计值
- $f_{\text{c}}^{\text{c}}$  —— 钢管混凝土轴心受压组合强度标准值(组合屈服点)
- $f_{\text{c}}$  —— 钢管混凝土轴心受压组合强度设计值
- $f_{\text{t}}^{\text{c}}$  —— 钢管混凝土轴心受拉组合强度标准值
- $f_{\text{t}}$  —— 钢管混凝土轴心受拉组合强度设计值
- $f_{\text{t}}^{\text{r}}$  —— 钢管混凝土受扭组合强度标准值
- $f_{\text{t}}^{\text{r}}$  —— 钢管混凝土受扭组合强度设计值
- $f_{\text{v}}^{\text{c}}$  —— 钢管混凝土受剪组合强度标准值
- $f_{\text{v}}$  —— 钢管混凝土受剪组合强度设计值
- $f_{\text{c},t}$  —— 钢管混凝土受温度影响时轴心受压组合强度设计值
- $f_f$  —— 角焊缝抗拉、抗压和抗剪强度设计值

#### 内外力

- $M^{\text{s}}$  —— 标准荷载作用下的弯矩
- $M$  —— 计算荷载作用下的弯矩
- $T_0$  —— 破坏荷载作用下的扭矩
- $T$  —— 计算荷载作用下的扭矩
- $M^{\text{p}}$  —— 破坏荷载作用下的弯矩
- $N^{\text{s}}$  —— 标准荷载作用下的轴心力
- $N$  —— 计算荷载作用下的轴心力
- $N_p$  —— 破坏轴心力
- $N_y$  —— 屈服轴心力
- $N_{\sigma}$  —— 临界力
- $N_u$  —— 最大极限荷载轴心力
- $N_d$  —— 设计极限荷载轴心力
- $N^{\text{t}}$  —— 抗拉极限荷载轴心力
- $V_0$  —— 破坏荷载作用下的剪力
- $V$  —— 计算荷载作用下的剪力
- $P$  —— 紧箍力
- $P_0$  —— 钢管混凝土进入塑性阶段时的紧箍力

#### 应力应变

- $\sigma_s(\sigma_{s1})$  —— 钢管纵向应力
- $\sigma_r(\sigma_{r1})$  —— 钢管径向应力
- $\sigma_t(\sigma_{t1})$  —— 钢管环向应力
- $\sigma'_s(\sigma'_{sc})$  —— 核心混凝土纵向应力
- $\sigma'_r(\sigma'_{rc})$  —— 核心混凝土径向应力

- $\sigma_1'(\sigma'_{1c})$  —— 核心混凝土环向应力  
 $\sigma_o$  —— 核心混凝土的极限压应力  
 $\sigma_{cr}$  —— 临界应力  
 $\varepsilon_3(\varepsilon_{3s})$  —— 钢管纵向应变  
 $\varepsilon_2(\varepsilon_{2s})$  —— 钢管径向应变  
 $\varepsilon_1(\varepsilon_{1s})$  —— 钢管环向应变  
 $\varepsilon_3'(\varepsilon_{3c})$  —— 核心混凝土纵向应变  
 $\varepsilon_2'(\varepsilon_{2c})$  —— 核心混凝土径向应变  
 $\varepsilon_1'(\varepsilon_{1c})$  —— 核心混凝土环向应变  
 $\varepsilon_o$  —— 核心混凝土的极限压应变

### 几何尺寸

- $A_s$  —— 钢管截面面积  
 $A_c$  —— 核心混凝土截面面积  
 $A_1$  —— 格构式柱腹杆钢管截面面积  
 $D$  —— 钢管外直径  
 $r_o$  —— 钢管外半径  
 $r_{co}$  —— 核心混凝土外半径  
 $r_{co}$  —— 核心混凝土内半径  
 $r$  —— 钢管内半径; 格构式柱的节间数  
 $t$  —— 钢管壁厚度  
 $e$  —— 荷载作用偏心距  
 $e/r$  —— 相对偏心率  
 $m$  —— 柱肢数  
 $t_w$  —— 钢梁腹板厚度  
 $t_b$  —— 肩梁板厚度  
 $B$  —— 梁或加强环板宽度; 柱抗侧移刚度  
 $b$  —— 计算宽度  
 $b_e$  —— 柱管壁参加加强环板工作的有效宽度  
 $c$  —— 加强环板的最小宽度  
 $H$  —— 柱高度  
 $h$  —— 梁截面高度  
 $h_f$  —— 角焊缝焊脚尺寸  
 $L$  —— 构件计算长度  
 $l_f$  —— 焊缝计算长度  
 $\lambda_{sc}$  —— 钢管混凝土构件长细比  
 $\lambda_{ox}$  —— 组合柱对虚轴  $x-x$  的换算长细比

- $\lambda_{oy}$  —— 组合柱对虚轴  $y-y$  的换算长细比  
 $I_x$  —— 钢管混凝土构件截面惯性矩  
 $I_f$  —— 格构式柱腹杆截面惯性矩  
 $W_x$  —— 钢管混凝土构件截面抵抗矩  
 $i_x$  —— 钢管混凝土构件截面回转半径  
 $\alpha$  —— 含钢率,  $\alpha = A_s/A_c$   
 $\psi$  —— 空心率,  $\psi = r_{ci}/r_{co}$

### 计算系数

- $\gamma_R, \gamma_R'$  —— 钢材和混凝土的材料强度分项系数  
 $\gamma_{SCR}$  —— 钢管混凝土组合材料强度分项系数  
 $\varphi$  —— 轴心受压构件稳定系数  
 $\varphi_p$  —— 偏心受压构件稳定系数  
 $\varphi_{ps}$  —— 格构式偏心受压构件稳定系数  
 $\beta$  —— 作用于加强环板的双向轴力的比值, 结构可靠度指标  
 $\beta_m$  —— 等效弯矩系数  
 $K_c$  —— 考虑混凝土徐变时的强度折减系数  
 $K_t$  —— 考虑温度时的强度折减系数  
 $\gamma$  —— 柱的刚度折减系数  
 $C_1$  —— 阶形柱上柱对下柱刚度影响系数

# 目 录

第一章 概述 .....	1-29
第一节 发展概况 .....	1
第二节 钢管混凝土结构的种类和特点 .....	6
第三节 钢管混凝土结构的应用 .....	14
第二章 材料 .....	30-53
第一节 钢材性能 .....	30
第二节 残余应力对钢材性能的影响 .....	33
第三节 混凝土性能 .....	40
第四节 钢管规格和要求 .....	46
第五节 混凝土强度等级和要求 .....	47
第三章 钢管混凝土轴心受力时的基本工作性能 .....	54-107
第一节 钢管混凝土一次受压的工作性能 .....	54
第二节 钢管混凝土轴心受压的工作机理 .....	62
第三节 钢管混凝土轴心受拉的工作性能 .....	70
第四节 钢管混凝土轴心受力时的强度设计指标 .....	71
第五节 合成法确定钢管混凝土的基本性能 .....	89
第四章 钢管混凝土的有限元分析—实心与 空心钢管混凝土系列 .....	108-137
第一节 钢管混凝土系列 .....	108
第二节 钢管混凝土轴心受力时的应力分布和破坏状态 .....	109
第三节 钢材在三向应力状态下的本构关系 .....	111
第四节 混凝土在三向应力状态下的本构关系 .....	114
第五节 轴心受力钢管混凝土应力应变系列全曲线 .....	122
第五章 钢管混凝土组合性能指标及各种因素的影响 .....	138-183
第一节 钢管混凝土组合性能指标 .....	138
第二节 混凝土徐变影响 .....	149
第三节 混凝土收缩影响 .....	160



第四节	温度影响 .....	163
第五节	焊接影响 .....	174
<b>第六章</b>	<b>轴心受力构件 .....</b>	<b>184—223</b>
第一节	轴心受力构件的强度 .....	184
第二节	轴心受压构件稳定计算的回顾 .....	186
第三节	应用切线模量理论确定临界力 .....	197
第四节	应用双模量理论确定临界力 .....	202
第五节	格构式轴心受压构件 .....	212
<b>第七章</b>	<b>受弯构件 .....</b>	<b>224—245</b>
第一节	简介 .....	224
第二节	合成法确定受弯构件的工作性能 .....	229
第三节	有限元法确定受弯构件的工作性能 .....	232
<b>第八章</b>	<b>纯扭与剪切 .....</b>	<b>246—256</b>
第一节	受扭构件的特点 .....	246
第二节	有限元法确定受扭构件的工作性能 .....	246
第三节	钢管混凝土抗扭承载力 .....	251
第四节	钢管混凝土抗剪设计指标 .....	253
<b>第九章</b>	<b>钢管混凝土统一理论 .....</b>	<b>257—305</b>
第一节	统一理论的基本概念 .....	257
第二节	用内时理论描述核心混凝土本构关系 .....	257
第三节	偏心受力构件 .....	260
第四节	受压和受扭构件 .....	288
第五节	受弯和受扭构件 .....	293
第六节	压、弯、扭构件 .....	297
第七节	压、弯、扭、剪构件 .....	304
<b>第十章</b>	<b>钢管混凝土结构 .....</b>	<b>306—385</b>
第一节	钢管混凝土结构体系 .....	306
第二节	钢管混凝土结构的构造特点 .....	308
第三节	桁架的节点构造 .....	320
第四节	单层工业厂房柱的构造 .....	322
第五节	多层建筑物柱的构造 .....	332
第六节	刚度与变形计算 .....	368
第七节	钢管混凝土空间结构体系抗侧向力性能 .....	383

第十一章	可靠度分析与优化设计 .....	386—418
第一节	可靠度计算方法简述 .....	386
第二节	钢管混凝土基本构件的可靠度分析 .....	388
第三节	钢管混凝土基本构件按 $\beta=3.2$ 时设计公式的修正 .....	399
第四节	结构优化方法简述 .....	405
第五节	钢管混凝土基本构件的优化设计 .....	408
第十二章	钢管混凝土结构的施工 .....	419—431
第一节	钢管混凝土结构的施工特点 .....	419
第二节	钢管构件的制作 .....	420
第三节	管内混凝土施工 .....	422
第四节	钢管混凝土结构的质量标准与检查 .....	428
第十三章	钢管混凝土结构工程实例 .....	432—449
第一节	单层工业厂房 .....	432
第二节	多层工业与多层民用建筑 .....	435
第三节	各种构架 .....	438
第四节	拱桥和拱架 .....	443
第五节	高层建筑 .....	446
第十四章	钢管混凝土结构的发展 .....	450—463
第一节	钢管混凝土结构在我国的发展 .....	450
第二节	撑杆式预应力钢管混凝土柱 .....	451
第三节	预应力钢管混凝土受弯构件 .....	458
附录:	钢管混凝土杆件几何特征 .....	464—472
参考文献	.....	473—488

# CONTENTS

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	<b>1—29</b>
§1 General situation of development .....	1
§2 Types and characteristics of CFST Structures .....	6
§3 Applications of CFST Structures .....	14
<b>Chapter 2 Materials</b> .....	<b>30—53</b>
§1 Behaviours of steel .....	30
§2 Effect of residual stresses on the behaviour of steel .....	33
§3 Behaviours of concrete .....	40
§4 Specifications and requirements of steel tube .....	46
§5 Grades and requirements of concrete .....	47
<b>Chapter 3 Basic behaviours of CFST under axial loading</b> ...	<b>54—107</b>
§1 Behaviours of CFST under axial compression .....	54
§2 Mechanism of CFST under axial compression .....	62
§3 Behaviours of CFST under axial tension .....	70
§4 Strength design index of CFST under axial loading .....	71
§5 Basic behaviours of CFST determined by use of composed method .....	89
<b>Chapter 4 Finite element analysis of CFST—solid and hollow         CFST series</b> .....	<b>108—137</b>
§1 Series of CFST .....	108
§2 Stress distributions and damage states of CFST under axial loading .....	109
§3 Constitutive relationship of steel under triaxial stresses state .....	111
§4 Constitutive relationship of concrete under triaxial stresses states .....	114
§5 Stress—strain series complete relative curves of CFST under axial loading .....	122