

## 原创性声明

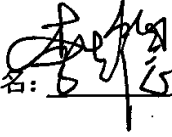
本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 日期：2007.5.20

## 关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解山东大学有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

（保密论文在解密后应遵守此规定）

论文作者签名： 导师签名：许延生 日期：07.5.28

## 摘要

近几年来,随着钢管混凝土结构逐渐被广泛应用于高层建筑中,其所表现出的优点和发挥的作用越来越受重视。作为一种新型的钢-混凝土组合结构,其施工工艺有待进一步的改进和完善,使其更具经济优势。本论文针对钢管混凝土结构在高层建筑应用中的施工技术及经济性优势等方面进行了研究,主要进行了以下几方面的工作:

1. 对钢管混凝土的应用现状进行了总结归纳。
2. 论述了钢管混凝土结构的计算理论。
3. 配合比、火灾作用下的力学性能、徐变理论进行了初步的探讨研究。
4. 钢管混凝土节点构造、施工工艺及其工艺流程研究。
5. 列举几个较有代表性的钢管混凝土结构工程实例,着重对在工程中分别采用钢筋混凝土和钢管混凝土两种结构进行计算,并对其计算结果和经济指标进行了分析对比。
6. 综合各方面的情况,对钢管混凝土在高层建筑工程中的应用前景和发展趋势进行了研究和探讨。

本论文对于钢管混凝土在高层建筑中的应用、经济分析以及施工工艺的探讨都还只是初步的,今后还应作更进一步的深入研究,为钢管混凝土在高层建筑中的应用提供更有价值的参考依据。

**关键词:** 钢管混凝土; 钢筋混凝土; 耐火性; 高层建筑; 经济分析; 钢管混凝土节点。

## Abstract

The application of steel pipe concrete pillar has more than one hundred years, whose study theory is approaching consummate, This paper briefly reviews the application and development of steel pipe concrete pillar, and introduces the comparatively mature theory-unite theory of steel pipe and concrete. By means of actual project, this paper refers the necessity of application of steel pipe concrete pillar and the structural style in high-rise architecture. This paper presents the formation, working mechanism , merit and demerit of several common connection details of concrete-filled circular steel tube column and steel beam. The connections can be categorized as through column and through—beam types with different design concepts. The paper also introduces a new type of connection for concrete filled circular steel tube column and steel beam, using bolted end plates. The characters. research situation and engineering application of concrete-filled steel tubes are introduced in this paper. The research direction of concrete-filled steel tubes is discussed. Introduction to Connections for concrete-filled steel tubes .

**Key words:** concrete-filled steel tubes; Fire resistance performance; high-rise architecture; Economy analyses; the node of Concrete-filled Steel Tubes.

## 第一章 钢管混凝土结构发展概况综述

### 1.1 钢管混凝土的概念

钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土而形成的构件，按截面形式的不同，可以分为圆钢管混凝土，方形、矩形和多边形截面钢管混凝土等，其中圆形截面和矩形截面钢管混凝土结构应用较为广泛。钢管混凝土利用钢管和混凝土两种材料在受力过程中的相互作用，即钢管对其核心混凝土的约束作用，使混凝土处于复杂的应力状态之下，不但提高了混凝土的抗压强度，而且还使其塑性和韧性性能得到改善。混凝土塑性、韧性的改善使本属于脆性的材料转变为塑性材料，而且避免和延缓钢管过早地发生局部屈曲，从而提高了结构的可靠度、强度，又节省了材料，降低了造价。通过钢管和混凝土组合而成为钢管混凝土，不仅可以弥补两种材料各自的缺点，而且还能充分发挥二者的优点。

近 20 年来，钢管混凝土结构逐渐被应用于建筑结构尤其是在高层建筑结构中，随着建筑物高度的增加，钢管高强混凝土和钢管超高强混凝土结构的应用也将会得到快速的发展。一般的，我们把混凝土强度等级在 C50 以下的钢管混凝土称为普通钢管混凝土；混凝土强度等级在 C50 以上的钢管混凝土称为钢管高强混凝土；混凝土强度等级在 C100 以上的钢管混凝土称为钢管超高强混凝土。随着经济全球化及我国加入世界贸易组织（WTO），势必吸引越来越多的人涌向城市，而城市人口的增加必然造成城市用地的紧张。这样一来，高层建筑的不断增加将是一个必然的趋势。

钢管混凝土是在劲性钢筋混凝土及螺旋配筋混凝土基础上演变和发展起来的。最早应用钢管混凝土的工程之一是 1879 年英国的 Severn 铁路桥桥墩，目的是防止锈蚀并承受压力，之后，钢管混凝土又做为单层工业厂房的结构柱。1897 年美国人 John Lally 在圆形钢管中填充混凝土作为房屋建筑的承重柱（称为 Lally 柱）并获得专利。前苏联在五六十年代对钢管混凝土结构进行了大量研究，并在一些土建工程，如工业厂房和拱桥结构中进行了应用。电力建设部 1951 年出版了《劲性钢筋混凝土设计规范》，1978 年又出版了《劲

性钢筋混凝土结构设计指南》。英国、美国和德国等，主要研究圆形和矩形钢管混凝土结构，核心混凝土为素混凝土或在核心混凝土中配置钢筋或型钢。1944年美国颁发的《公路桥涵设计规范》，1946年颁发的《房屋钢结构设计、制造和安装规范》均纳入了组合梁设计部分。1979年美国钢结构学会（AISC）颁布了《钢与混凝土组合柱设计规范》。在英国的标准规范 CP110，CP117，BS5400，BS449 和桥梁法规 B116/5 等中都纳入了组合柱、梁的设计部分。欧洲钢结构协会（ECCS）1981 年出版了《组合结构规程及其说明》，1985 年欧洲经济共同体（EEC）建筑与土木工程部制定了统一标准规范《钢与混凝土组合结构》。德国 1945 年制定了《桥梁组合梁标准》（DIN1078），1956 年制定《房屋建筑组合梁标准》（DIN4239）。日本建筑学会 1958 年颁发了《型钢混凝土结构计算标准》，到 1987 年已修订过三次。近些年来，美国、澳大利亚和日本等国的学者，开始研究在钢管中填充高强混凝土形成的钢管高强混凝土构件的工作性能，并在这些工程结构中推广应用。例如 1988~1989 年在西雅图建成的 58 层的 Twounion square 大厦和 Qacifre firstcenter 大厦；澳大利亚墨尔本 1991 年建成的 Casselden placeproject 和悉尼的 Market city project 等。目前主要设计规程还有 EC4（1996）德国 DIN188009（1997）美国：JCI319-89 和 LRFD（1994）和日本的 AIJ（1980，1997）等。

我国最早开展对钢管混凝土基本理论研究的是中国科学院哈尔滨土木建筑研究所。此后，国内的哈尔滨建筑大学、中国科学研究院、苏州混凝土与水泥制品研究院、北京地下铁道工程局及电力工业部电力研究所等单位都先后对基本构件的设计方法、节点构造和施工技术 etc 开展了比较系统的研究，取得了可喜的成果。这些成果已在圆形钢管混凝土柱的研究中领先于国际水平，并大致形成三个理论体系，集中反映在蒋家奋和汤关柞编写的《三向应力混凝土》、蔡绍怀编著的《钢管混凝土结构的计算与应用》和钟善桐编著的《钢管混凝土结构》这三本书中。1986 年中国钢结构协会组建了钢—混凝土组合结构协会，并且每两年组织一次年会，年会学术交流活跃，研究内容深入。目前国内关于钢管混凝土结构设计还没有国家标准，但一些行业制定了相关设计规程，主要有以下三种：国家建材总局编制的《钢管混凝土设计与施工规程》（JCJ01—89（1989），中国工程建设标准化协会编制的《钢管混

土设计及施工规程》CECS28: 90 (1992), 电力行业编制的《钢混凝土组合结构设计规程》DL/T5085—1999 (1999) 和 GJB (1999), 目前钢—混凝土组合结构已被列入国家科技成果重点推广项目, 为进一步在实际工程中推广应用钢管混凝土创造了条件。

从发展商的角度看, 为了增加利润, 除了“问天要地”(增加建筑物的层数) 和“问地要地”(利用多层地下室) 外, 就建筑物本身而言, 他们更希望设计者在满足设计要求的前提下, 通过采用新技术、新工艺、新材料和新的结构形式等去实现。例如, 在结构设计方面, 通过采用高强度材料去缩小构件的截面面积, 从而增加更多的有效使用面积与及减小层高等; 在工程施工方面, 通过采用逆作法来缩短工期, 从而缩短投资的回收期及节省贷款利息等。

众所周知, 在高层建筑中, 由于建筑物本身层数多、高度大, 以致每个竖向构件需要承担很大的重力荷载, 而且风荷载和地震力引起的水平荷载也给建筑物带来非常大的弯矩、水平剪力和倾覆力矩, 这就要建筑物的结构必须在强度、刚度和延性三方面都能满足设计要求。在钢筋混凝土结构中, 为了满足强度和刚度的要求, 构件的截面尺寸往往很大, 这使得建筑物的有效使用面积减小, 而且由于自重增大, 不但是基础工程的造价增加, 而且地震作用引起的地震反应也增大; 另外, 钢筋混凝土结构的施工工期较长。这样的结果, 不论是设计者还是发展商都不愿意看到。钢结构相对而言虽然强度高, 自重较轻, 而且延性好, 抗震性能优越, 施工速度快, 但是它的耐火性能较差, 而且造价高, 亦未如设计者和发展商的理想。

就建筑材料而言, 混凝土与钢材至今为止仍是无可代替的, 两者的共同发展方向在现时主要是提高强度。例如混凝土, 现时我国已有应用 C80 的工程实践。但是, 混凝土的强度越高, 它的脆性也就越大。尤其在地震区, 高强混凝土延性差的问题更为严重, 这就大大限制了它的推广与应用。

钢—混凝土组合结构的出现正好解决了这些问题。它的优点在于充分发挥了这两种材料的优势, 互相取长补短。

近几年来, 在高层和超高层建筑中逐渐开始采用钢管混凝土结构, 它是介于钢结构和钢筋混凝土结构之间的一种新型的钢—混凝土组合结构, 具有许多钢筋混凝土结构和钢结构所不能比拟的优点。

钢管混凝土结构一般是在圆形（或方形）钢管中灌注混凝土而形成的构件。在轴心压力的作用下，一方面钢管对核心混凝土提供了套箍作用，使混凝土处于三向受压状态，延缓了混凝土受压时的纵向开裂，从而大大提高了混凝土的抗压强度和变形能力；另一方面，钢管又利用管内的混凝土来防止钢管壁的局部屈曲，从而增强钢管壁的稳定性的，使钢管的抗压强度也得到充分发挥（图 1-1）。由此可见，利用钢管和混凝土两种材料在受力过程中相互间的组合作用，弥补了彼此的弱点，而且承载力远远超过了两者在单独承受荷载是的承载力之和，因而在高层与超高层建筑、桥梁工程、特种结构工程领域中越来越多地受到工程技术界人士的重视，发展非常迅速，应用前景十分广阔。

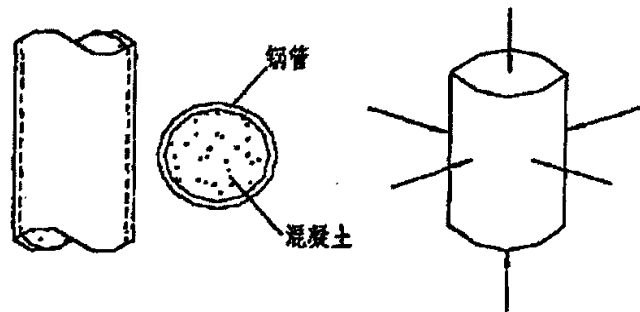


图 1-1 钢管混凝土

## 1.2 钢管混凝土的分类

对钢管混凝土分类的定义各有不同，在日本 AIJ 钢管混凝土结构设计中，构件形式包括内填型、外包型、内填外包型三种，又分为圆形和方形等。其他国家有关设计规范，大都只涉及内填型和内填外包型两类。且多数国家在内填型构件截面中，又设置了纵向钢筋，以提高构件的承载力和抗火能力。

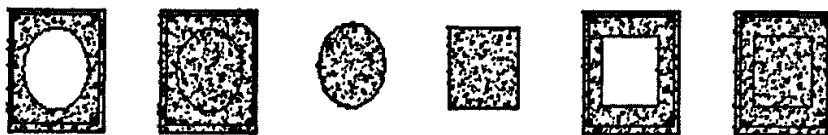


图 1-1 截面型式

钟善桐所著《钢管混凝土结构》[4]中,认为外包型和内填外包型应归于劲性钢筋混凝土(SRC)一类。其所定义的钢管混凝土是指内填素混凝土,不再配置钢筋。包括圆形、矩形和方形及多边形管。

而建研院蔡绍怀所著《现代钢管混凝土结构》[5]指出,所谓“钢管混凝土”是指“钢管套箍混凝土”(Steel Tube—Confined Concrete)的简称。英文缩写为STCC。它是将混凝土填入薄壁圆形钢管内而形成的组合结构材料。而方钢管对核心混凝土并无多大套箍约束作用,不属于套箍混凝土之列。

### 1.3 钢管混凝土的特点:

#### 1. 承载力高

由于薄壁钢管临界承载力极不稳定,在钢管中填充混凝土形成钢管混凝土后,钢管约束了混凝土,在轴心受压荷载作用下,混凝土三向受压,从而使核心混凝土具有更高的抗压强度和变形性能,延缓了受压时的纵向开裂;同时,钢管的套箍作用大大提高了混凝土的力学性能,使混凝土特别是高性能混凝土的脆性弱点得到了克服。另一方面,混凝土填于钢管之内,增强了钢管管壁的稳定性,其稳定性也有了极大的提高。而混凝土的存在却可以避免或延缓薄壁钢管过早地发生局部屈曲,两种材料相互弥补了彼此的弱点,却可以充分发挥彼此的长处,从而使钢管混凝土具有很高的承载力,大大高于组成钢管混凝土的钢管和核心混凝土单独承载力之和。试验表明,钢管混凝土柱是空钢管和素混凝土柱单独承载力之和的 1.73 倍。

#### 2. 塑性和韧性好

混凝土脆性较大,对于高强度混凝土更是如此,其工作的可靠性因此而大为降低。如果将混凝土灌入钢管中形成钢管混凝土,核心混凝土在钢管的约束下,不但在使用阶段改善了它的弹性性质,而且在破坏时具有很大的塑性变形。试验表明,钢管混凝土柱被破坏时可以压缩到原长的  $2/3$ ,完全没有脆性破坏的特征。处于钢管中的混凝土已经由脆性破坏转变为塑性破坏,使整个构件呈现出弹性工作塑性破坏的特征。此外,这种结构在承受冲击荷载和振动荷载时,也具有很好的韧性。

### 3. 施工方面

钢管混凝土在本质上属于套箍混凝土，钢管本身就是耐侧压的模板，在浇灌混凝土时，可省去模板的施工，采用钢管混凝土无需绑扎钢筋、支模和拆模等工序，施工简便，并可大幅度采用泵送混凝土、高位抛落不振捣混凝土和免振自密实混凝土等施工工艺，从而大大加速钢管混凝土构件的施工进度。同时钢管本身又兼有纵向钢筋和横向箍筋的作用，制作钢管远比制作钢筋骨架省工，而且便于浇灌混凝土；另外钢管本身又是劲性承重骨架，在施工阶段可起劲性钢骨架的作用，其焊接工作量远比一般型钢骨架少。另外，空钢管构件的自重小，可以大大减少运输和吊装等费用。

### 4. 耐火、耐腐蚀性能好

由于组成钢管混凝土的钢管和其核心混凝土之间具有相互贡献、协同互补、共同工作的特点，这种结构具有较好的耐火性能。此外，钢管中浇筑混凝土使钢管的外露面积减小，受外界气体腐蚀面积比钢结构少得多，抗腐和防腐所需费用也比钢结构节省。

### 5. 经济效果好

大量工程实践表明：采用钢管混凝土的承压构件比普通钢筋混凝土承压构件约节约混凝土 50%，构件的横截面积可减少一半，从而使建筑空间得到加大，减轻结构 50%左右，钢材用量略高约略相等；和钢结构相比，可节约钢材 50%左右，并节省大量的焊接工作。另外，钢管混凝土本身的施工特点符合现代施工技术工业化的要求，可大量节约人工费用，降低工程造价。

#### 1.4 钢管混凝土结构的工程应用概况

早在 19 世纪 80 年代，钢管混凝土结构就已经出现。1879 年英国赛文（severn）铁路桥的建造中采用了钢管桥墩，在钢管中灌了混凝土以防止内部锈蚀并承受压力。前苏联乌拉尔的伊谢特铁路桥采用钢管混凝土构件做拱形桁架的上弦和上部建筑的柱子，省钢 25%。1961 年比利时建造船坞时，采用钢管混凝土构件做桁架的压杆和立柱，比钢结构节省钢材 40%。法国巴黎居

民区的第一座摩天大楼采用了钢管混凝土框架柱，比钢结构节省钢材 40%。前苏联在一些吊车栈桥（跨度达 48m）中采用钢管混凝土结构，比全钢结构节省钢材 12%—28%，降低造价 28%，比钢筋混凝土结构省钢 9%，降低造价 56%。日本、瑞士等国在输电跨越塔中采用了钢管混凝土结构，也都取得了显著的经济效益。

在 20 世纪 60 年代以前，由于钢管内浇注混凝土的施工工艺尚未得到很好的解决，现场的施工操作显得繁琐，钢管混凝土结构在施工性能方面的优势没有得到应有的发挥。到 80 年代后期，由于泵送混凝土工艺的发展，解决了现场钢管内部浇灌混凝土的工艺问题，加上现代高强混凝土需要用钢管约束来克服其脆性。因此，钢管混凝土结构在美国和澳大利亚等国的高层建筑中得到了广泛应用，被认为是高层建造技术的一次重大突破。

我国钢管混凝土结构技术的开发和应用已有近 40 年的历史。1966 年钢管混凝土结构应用于北京地铁车站工程，70 年代又在单层工业厂房、重型构架中得到了成功的应用。近 10 年来，随着国家经济的迅猛发展，钢管混凝土结构在我国的高层建筑工程、地铁车站工程和大跨度桥梁工程中得到了卓有成效地应用，推动了建造技术的发展。在我国，钢管混凝土结构主要应用于以下的领域中。

#### 1.4.1 高层建筑工程

在高层建筑结构中，钢管混凝土柱具有很大的优势：具有承载力高，抗震性能好的特点，既可以取代钢筋混凝土柱，解决高层建筑结构中普通钢筋混凝土结构底部的“胖柱”问题和高强钢筋混凝土结构中柱的脆性破坏问题；也可以取代钢结构体系中的钢柱，以减少钢材用量，提高结构的抗侧移刚度。钢管混凝土构件的自重较轻，可以减小基础的负担，降低基础的造价。全部采用钢管混凝土柱的工程可以采用“全逆作法”或“半逆作法”进行施工，从而加快施工进度；钢管混凝土柱的钢材厚度较小，取材容易、价格低。其耐腐蚀和防火性能也优于钢柱。钢管混凝土柱不易倒塌，即使损坏，修复和加固也比较容易。

#### 1.4.2 大跨度桥梁工程

随着经济的迅速发展，需要建造能够跨越江河、海湾和山谷的，安全、

经济且轻盈美观的大跨度桥梁。在我国，钢管混凝土已经被广泛地应用于拱桥结构中，也开始应用于斜拉桥结构中。

在拱桥结构中，钢管混凝土构件主要用来承受轴向压力。拱桥的跨度很大时，拱肋将承受很大的轴向压力，采用钢管混凝土构件是非常合理的。另外，钢管可以作为桥梁安装架设阶段的劲性骨架和灌注混凝土的模板。因此，钢管混凝土被认为是建造大跨度拱桥的一种比较理想的复合结构材料。自1990年在四川省旺苍县建成跨度为115米的我国第一座钢管混凝土拱桥以来，在10来年的时间里，我国已经建成了100多座钢管混凝土拱桥，其中跨度在100米以上的就有30多座，尤其是重庆市万县长江公路大桥，跨度达到420米，一跨过江。经过多年的实践，我国在钢管混凝土拱桥建设上已经积累了丰富的经验，形成了一套较为完整的钢管混凝土拱桥建造技术。

近年来，在斜拉桥和梁式桥中也开始采用钢管混凝土结构，同样取得了良好的经济效益。例如，广东南海市紫洞大桥、湖北秭归县向家坝大桥和四川万县万洲大桥都采用了钢管混凝土空间桁架组合梁式结构，减轻了结构恒载，提了结构承载力利用系数，同时采用与之相适应的、合理的施工工艺，简化了施工程序，减少了施工设备，加快了施工进度，降低了工程造价。在对广东南海市紫洞大桥主桥进行了技术经济分析，主桥采用钢管混凝土空间桁架组合梁式结构与采用预应力混凝土连续钢结构方案相比较，可以节省混凝土44%，节省预应力钢材62%，增加普通钢材23%。加上施工设备、临时设施和施工工期等方面的因素，主桥的经济效益就更为可观。钢管混凝土空间桁架组合梁式结构适用于多种桥型，如系杆拱桥结构、特大跨径斜拉桥结构、特大跨径悬索桥结构等，推广其应用必将带来显著的经济效益和社会效益。

#### 1.4.3 地铁车站工程

地铁车站是我国最早采用钢管混凝土结构的工程项目。早期的地铁车站是深埋地下的多跨结构，用明挖法施工；采用钢管混凝土柱主要是利用其承载力高的特点，以减小柱子的截面尺寸，有效地利用空间。近年来，在城市中心地区修建的地铁车站多为浅埋式的、具有综合功能的多层地下建筑。采用盖挖逆作法施工，以尽量减少对城市正常生活的干扰以及对地面交通和邻近建筑的影响。盖挖逆作法，是先施工地下结构的顶盖，在顶盖的保护下进

行开挖，按照从顶到底的顺序进行施工。为此，必须在土方开挖前设置好顶盖的中间支撑柱，钢管混凝土柱将施工阶段的临时柱和结构的永久柱合二为一，因此是最好的选择。90 年代以来，北京地铁的复八线工程中，采用盖挖逆作法建成了“天安门东站”、“大北窑站”和“永安里站”；在建中的南京地铁的“三山街站”也是采用的盖挖逆作法进行施工。

#### 1.4.4 单层和多层工业厂房柱

单层工业厂房的柱属于偏心受压构件，为了充分发挥钢管混凝土结构的特点，很多工程中的柱子设计成格构式组合柱，如双肢柱、三肢柱和四肢柱，把偏心弯矩转变为轴心力。如 1972 年建成的本溪钢铁公司二炼钢轧辊钢锭模车间采用了四肢柱；1980 年建成的太原钢铁公司第一轧钢厂第二小型厂的下柱采用双肢柱；1982 年建成的吉林种籽处理车间采用了三肢柱；1980 年建成的武昌造船厂船体结构车间采用了四肢柱。与钢筋混凝土柱和普通钢柱相比，钢管混凝土组合柱显得特别轻巧，节约钢材，施工简便，同时刚度好。单层工业厂房中采用钢管混凝土柱时，钢管中混凝土的浇注可以在全部主体结构安装完成后进行，所以大大缩短了工期。如 1992 年建成的哈尔滨建成机械厂大容器车间，从破土动工到竣工只用了 15.5 个月；同年该厂又建成了容罐式汽车车间，主体结构的施工仅用了半年时间。

80 年代初，我国开始在多层工业厂房中采用钢管混凝土柱。多层工业厂房柱基本为偏心受压单管柱；如 1984 年建成的上海特种基础科研所的科研楼，1985 年建成的柳州水泥厂窑尾加热车间。

#### 1.5 钢管混凝土结构的研究现状

20 世纪 60 年代之前，钢管混凝土结构的研究对象主要是圆钢管混凝土结构。从 60 年代后半期以后，开始比较系统地研究矩形钢管混凝土结构。目前，圆钢管混凝土结构的研究已经取得了丰硕的成果。在我国，钢管混凝土结构的研究主要集中在圆钢管中填充素混凝土的内填型圆钢管混凝土结构，最早开展研究工作的是原中国科学院哈尔滨土建研究所。1968 年以后，中国建筑科学研究院、冶金部冶金建筑科学研究所等单位也先后对钢管混凝土基本构件的工作性能、设计方法、节点构造和施工技术等方面展开了系统的研究。进入 80 年代后，研究工作进一步深入，通过大量的试验研究和理论分析，对构件的承载力和变形性能及其影响因素进行了全面的研究，得到了实用的设

计计算公式。与此同时,钢管混凝土结构的施工技术也在迅猛发展,涌现出很多新的施工工艺和施工方法,钢管混凝土结构的优势得到了更加充分的发挥。近十几年来,我国钢管混凝土结构的科学研究和工程应用都取得了令人瞩目的成就。目前已经先后有国家建材局、中国工程建设标准化委员会、国家经济贸易委员会和解放军总后勤部颁布发行了有关钢管混凝土结构的设计规程。为钢管混凝土结构在我国的推广奠定了坚实的基础,使钢管混凝土结构广泛应用于各种大型建筑工程和交通运输工程中。钢管混凝土结构的应用在近十年的时间里得到了飞速的发展。

我国对于矩形钢管混凝土结构的研究工作开展得较晚,1985年郑州工学院开始进行方钢管混凝土轴压短柱的研究,其后同济大学等单位也进行了方钢管混凝土构件的研究,取得了一定的成果,而我国的矩形钢管混凝土结构的设计施工规程尚在制定和完善中。

对于钢管混凝土的构件的研究存在各种不同的方法。其区别在于如何估算钢管和核心混凝土之间相互约束而产生的“效应”,这种“效应”的存在构成了钢管混凝土构件的固有特性,从而导致其力学性能的复杂性。因此,如何合理地估计这种相互作用的“效应”成为迫切需要解决的钢管混凝土理论研究热点课题。从广大设计部门的角度,不仅希望这一问题在理论上取得较透彻的解决,而且更希望能进一步提供便于工程设计人员使用的实用设计方法。从研究者的角度来说,在工程技术领域从事理论研究,其最终目的也应该是更好地为实际应用服务。各国的研究者从不同的角度对上述问题进行了研究,由于对钢管和混凝土之间紧箍效应理解不同,所获计算方法和计算结果也会有所出入。但无论采用那种办法,都有其合理性的一面。通过对以往有关研究者们大量卓有成效的理论和实验研究成果的分析和总结,一般认为组成钢管混凝土的钢管和混凝土之间的相互作用主要有现在以下两个方面:

(1)对于截面,表现在钢管对其核心混凝土的约束作用,使混凝土材料本身性质得到改善,即强度得以提高,塑性和韧性性能大为改善。同时,由于混凝土的存在可以延缓或阻止钢管不能发生内凹的局部屈曲;在这种情况下,不仅钢管和混凝土材料本身的性质对钢管混凝土性能的影响很大,而且二者几何特性和物理特性参数如何“匹配”,也将对钢管混凝土构件力学性能起着

非常重要的影响。可以认为“约束效应系数”是衡量这种相互作用的基本参数。

(2)对于构件,尤其是长细比较大的钢管混凝土构件,表现在由于混凝土的存在,构件的“屈曲模态”表现出很大的不同,从而使钢管混凝土构件的极限承载力和同等长度的空钢管相比具有很大的提高,核心混凝土的主要“贡献”就是延缓钢管过早地发生局部屈曲,从而使构件的承载力和塑性能力得到很大的提高,这时,混凝土材料本身的性质,例如强度等的变化对钢管混凝土构件性能的变化影响不很明显。

以上这种以充分考虑组成钢管混凝土的钢管和混凝土之间相互组合作用的分析方法自然是比较系统和完善的,而且得到大量实验结果的验证,计算结果也较精确。但是也要看到,从实际应用的角度考虑,这种理论方法显得还是比较复杂,不便于应用。

### 1.5.1 耐火性能

根据有关的试验研究结果,我们知道,混凝土的热容比钢材的热容大很多,钢材的热导系数却比混凝土的大很多,另外,虽然钢材的密度是混凝土的三倍,但由于钢管混凝土的含钢率一般都在8%左右,混凝土的体积将是钢管的11倍以上,在发生火灾时,外部钢管虽然升温较快,但内部混凝土升温滞后,因此温度不高的混凝土部分仍具有较高的承载力。由此可见,由于钢管和其核心混凝土之间相互贡献、协同互补、共同工作的优势。使得其耐火性能远高于钢结构。因此,在防火处理上,它可以获得比钢结构更佳的经济效益。

遗憾的是,到目前为止,我国还没有钢管混凝土结构防火方面的有关规定,有关文献仅要求“管混凝土结构表面温度不宜超过 $100^{\circ}\text{C}$ ,当超过 $100^{\circ}\text{C}$ 时,应采取有效的防护措施”以及“对有防火和防腐要求的结构,应按有关的专门规定,作防火和防腐蚀处理”,这些不足制约了钢管混凝土结构的推广,不但使得在当前的应用中,由于按照钢筋混凝土结构的要求采用外包混凝土,或者按照钢结构的要求采用防火涂料,虽然能保证结构的防火要求和安全性,但却使得该类结构大都偏于保守而且浪费,缺乏科学性和统一性,而且对于已建成的该类结构的耐火极限缺乏必要的科学依据。

至于钢管混凝土结构在火灾后的性能的研究,目前而言也还相当不够。火灾后,由于随着外界温度的降低,钢管混凝土结构已屈服截面处的钢管的

强度得到了不同程度的恢复，截面的力学性能在高温下有所改善，所有结构的整体性在火灾中也有所提高，这不仅为结构的加固补强提高了一个较安全的工作环境，同时也减少了补强工作量。因此，应当对火灾后的钢管混凝土结构的强度进行合理的评估，从而为维修加固提供科学的依据。随着钢管混凝土结构在高层建筑中的进一步推广应用，这一问题也愈加突出，有待加快研究。

### 1.5.2 钢管高强度混凝土

钢管高强度混凝土也是目前国内外学者的热门研究课题。高强混凝土具有强度高、早强、变形小、抗渗抗腐蚀性能优良等特点，能够大幅度提高工程结构和构件的承载能力，从而减小结构构件尺寸和自重，加快工程施工进度，还能经受恶劣的环境条件，若应用于荷载很大的结构，如高层建筑、地下工程和大跨度结构等，其经济效益十分显著。然而，高强混凝土的脆性大，延性差，必须采用一些特殊构造措施才能满足抗震要求。钢管混凝土结构是高层建筑中应用高强混凝土的一种经济有效的结构形式。首先，钢管对核心混凝土的约束作用能有效地克服高强混凝土的脆性；其次，钢管内无钢筋骨架，便于浇灌高强混凝土，避免了柱与梁板普通混凝土交错浇灌的麻烦，并且可以采用先进的泵灌混凝土工艺；而且，钢管兼有纵筋和箍筋的功能，其用钢量较普通钢筋骨架更节省。

目前，在国外的许多超高层建筑中，已采用了混凝土等级为 C70~C130 的钢管高强混凝土结构。在我国，已建成的广州中国大厦也采用了 C80 钢管高强混凝土结构。

钢管高强混凝土的基本力学性能与钢管普通混凝土有所不同，在进行高强度混凝土结构设计时，不能简单套用钢管普通混凝土结构的设计方法。我国目前仍然沿用文献(4)中的承载力计算公式，仅是套箍效果系数有所降低。

### 1.6 钢管混凝土存在的问题

1) 具有优越的抗震性能是钢管混凝土的重要特点，为合理而安全地在地震区推广这类结构，必须深入进行动力性能研究。但目前国内外对钢管混凝土的动力性能研究基本上只限于试验研究，尚没有提供可供规范使用的计算理论和设计公式；而且对钢管混凝土徐变和疲劳性能的研究相对较少，主要以试验研究为主，由于尚缺乏合理的设计方法，在一定程度上制约了钢管混

凝土在高层建筑和铁路桥梁等工程中的应用。

2) 钢管混凝土作为一种新型结构,我国尚未制定有关钢管混凝土结构防火设计方面的规定,所以制约了该类结构的推广应用。对已建成的结构,无论是采用外包以混凝土还是涂以防火涂料保证防火要求和结构的安全性都是偏于保守且造成浪费的,缺乏科学性和统一性。因此,在理论研究和工程实践的基础上,应尽快编制出适合我国国情的钢管混凝土结构防火规范。

3) 钢管混凝土结构的梁柱节点一直是工程应用和研究的关注点。虽然目前的设计规程和不少研究者提出了一些节点形式,但应尽快纳入设计规程,为钢管混凝土结构的推广应用提供一定基础。此外,节点的动力性能作为结构设计中的关键,施工的难点相对静力性能的研究较少。

4) 由于普通钢管混凝土结构最主要的特点是抗压承载力和良好的塑性、韧性,只能用作柱子,不宜用做受弯构件,故用途有限。从国内外的研究文献看,将钢管混凝土的优点与预应力技术相结合而成的预应力钢管混凝土组合空间结构,一般仅用作建筑柱子和桥梁的压力拱中,还没应用到空间桁架或网架等空间大中型结构或构件中。如果对其深入研究,弄清预应力钢管混凝土结构的受力变形特性和破坏机理,建立计算理论和设计分析方法,便可拓展这一新型组合结构的应用领域。

5) 钢管混凝土构件进行施工时,一般都是先安装空钢管结构,这时空钢管单独承受施工荷载,浇灌混凝土时又会在空钢管内产生动压力,可能导致在钢管局部产生应力集中现象,严重时可使钢管胀裂。所以应对钢管混凝土施工力学问题进行深入系统的研究,以提供合理的施工工艺和预防措施。

6) 随着建筑物的增高,建筑物的自重越来越大,为减轻柱子的截面尺寸以增加建筑物的使用面积,高强混凝土在高层建筑中的应用势必不可避免。钢管高强混凝土具有较好的延性,从而克服了高强混凝土延性和耗能能力差的缺点,并能满足高层建筑的抗震设计要求。因此,钢管高强混凝土力学性能的研究成为近年来钢管混凝土研究方面的热点[8]。而我国现行的钢管混凝土设计规程,只适用于普通钢管混凝土结构,所以应加大对钢管高强混凝土的研究力度,尽快制定出相应的设计规程。

7) 钢管混凝土在浇灌混凝土时,由于管径大,水泥、混凝土难以扩散水化热,使钢管中心的局部温度较大,可引起温度应力,度应力对大管径钢管

混凝土结构承载力的影响有待研究。

8) 国内外针对钢管混凝土可靠性理论方面的研究相对较少且尚未纳入各规程中。而大多数的结构设计人员缺乏了解和参与高强钢管混凝土结构实际工程设计的机会, 所以应将推广普及钢管混凝土结构的重点放在众多设计院身上, 还有就是应从可靠性方面加大研究力度, 简化设计难度, 以减轻设计人员的劳动负担, 真正使先进的工程技术成为一种能方便设计、方便使用的结构技术手段, 而不仅仅是一种可望而不可及的“奢侈品”。

### 1.7 本论文的研究目的和内容

本论文仅对钢管混凝土结构应用在高层建筑中的经济性和可行性作初步的探讨, 并对钢管混凝土结构的节点及其施工工艺理论进行介绍和总结, 目的旨在通过对一些具体工程的经济技术指标及其施工工艺作大概的分析对比, 为钢管混凝土在高层建筑结构中的推广应用, 提供经济效益方面的理论分析支持。

本论文的主要内容包括:

1. 对钢管混凝土的应用现状进行介绍, 介绍一些采用钢管混凝土结构的典型工程实例, 着重对在工程中分别采用钢筋混凝土和钢管混凝土两种结构进行计算, 重点对其与钢筋混凝土结构的经济指标进行分析对比。
2. 钢管混凝土结构的计算理论, 钢管混凝土柱的理论承载力计算。火灾作用下对力学性能、徐变理论进行了初步的探讨研究。
3. 对钢管混凝土结构的节点及其施工工艺、钢管混凝土对配合比进行介绍和总结。
4. 综合分析钢管混凝土的发展现状和应用实例, 展望钢管混凝土结构的发展趋势和需要解决的问题。

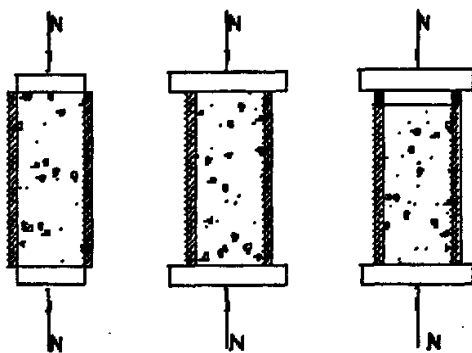
## 第二章 钢管混凝土特性的理论研究

### 2.1 钢管混凝土构件的基本工作原理

(1). 在压力作用下, 借助圆形钢管对核心混凝土的套箍约束作用, 使核心混凝土处于三向受压状态, 从而使核心混凝土具有更好的抗压强度和压缩变形能力。

(2). 借助内填混凝土的支撑作用, 增强其几何稳定性, 阻止了钢管向内屈曲变形, 改变空钢管的失稳状态, 从而提高其承载力。而国外最新的试验研究表明管内核心混凝土的支撑作用并不能增强圆管管壁的稳定性。众所周知, 钢材在弹性工作阶段泊松比  $\mu_s = 0.25 \sim 0.30$ , 平均值为 0.283, 达到塑性阶段值为 0.5。混凝土的横向变形系数  $\mu_c$  则随其纵向压应力的大小而改变, 由低应力开始为 0.17, 随压应力的增大而增大, 由 0.17 增至 0.5, 达到极限状态时, 由于纵向开裂, 甚至大于 1.0。

由此可见, 圆钢管混凝土短试件在轴心压力  $N$  的作用下, 开始时  $\mu_c < \mu_s$ , 待钢管纵向压应力  $\sigma_p \approx f_p$  (比例极限) 时,  $\mu_c = \mu_s$ 。因此, 在  $N$  力继续增大,



(a) 仅核心混凝土受压 (b) 钢管和混凝土同时受压 (c) 钢管预先受压

图 2-1 钢管混凝土柱的不同加载方式

钢管应力超过比例极限后,  $\mu_c$  将大于  $\mu_s$ , 即  $\epsilon_{1c} > \epsilon_{1s}$ 。意味着这时核心混凝土向外扩张的变形应大于钢管的直径扩张变形。这就使钢管箍住了混凝土, 阻碍了核心混凝土的直径扩张, 由此而产生了钢管与核心混凝土之间的相互

作用力  $P$ ，此力称为紧箍力。这就使钢管和核心混凝土都处于三向应力状态。钢管纵向受压、径向受压，环向受拉；而核心混凝土纵向、径向和环向皆受压。由于紧箍力作用，使混凝土强度大大提高，而且还由脆性材料转变为塑性材料，其基本性能起了质的变化。

建研院曾作过图 2-1 所示的三种不同加载方式试验，极限荷载几乎无甚差别。结果表明，钢管的作用在极限荷载时都最终转化为主要起环向套箍作用。而国外设计大多也只考虑环向套箍约束作用，并不考虑参与纵向承力。

## 2.2 钢管混凝土结构的计算理论

由于轴心受压是钢管混凝土最基本的力学性能，因此各国对钢管混凝土轴心受压展开了卓有成效的研究。尤其我国在这方面一直占有领先地位，其研究成果更为显著，下面就我国的研究情况作以介绍。

我国自 50 年代开始对钢管混凝土的基本理论进行了大量的研究，取得了可喜的成果，大致形成了三个理论体系，集中反映在文献[21][6][18][5]中。近几年相继颁布了三本有关钢管混凝土结构的设计与施工规范，分别与三个理论体系相对应。中国工程技術标准化协会标准《钢管混凝土结构设计施工规程》CECS 28: 90)，以下简称《CECS 28: 90》，基本理论依据见蔡绍怀《钢筋混凝土结构》[21]一书。该规程在基本构件中比《JCJ 01-89》更多地沿用了钢筋混凝土设计规范中的公式，主要依据钢管混凝土构件的试验结构，以经验回归公式为主。国家建材工业局颁布的《钢管混凝土结构设计施工规范》，(JCJ 01-89)，(以下简称《JCJ 01-89》)，基本理论依据是蒋家畜、汤关诤的《三向应力混凝土》[18]一书。该规程在基本构件计算中借用了混凝土结构设计理论的一些公式形式，根据钢管混凝土构件的实验结果和理论分析建立起来一套半经验半理论的计算公式和表格。能源部颁布的《钢-混凝土组合结构设计规程》(DL 5099-97)(以下简称《DL5099-97》)，由能源部电力规划设计管理局批准的《火力发电厂主厂房钢-混凝土组合结构设计暂行规定》(DLGJ 99-91)修订而成的，其中包含了钢管混凝土结构的内容。该规程的基本理论依据见钟善桐的《钢管混凝土结构》[5]一书。该规程所依据的基本

理论是钢管混凝土为一种材料，采用统一理论，以建立在试验基础上的理论公式为主，在公式形式方面更多的借鉴了钢结构的设计理论，对压弯构件采

用应力表达方式，而不是承载力，由于理论公式较繁，更多地采用了表格形式。

以上三本规程所涉及的对象均以房屋建筑中的柱系为主，这主要是由于钢管混凝土构件特别适合于轴心受压结构，轴心受力也是钢管混凝土的最基本特征。相应地钢管混凝土在轴心受压方面的静力性能研究的也较为全面、透彻，而其它静力性能（如偏心受压、受弯）及动力性能和耐火性相对研究较少。

## 2.3 钢管混凝土柱的理论承载力计算

钢管混凝土结构因其材料抗压强度高、自重轻、抗震性能突出、施工方便、外型美观和造价经济等优点，在结构工程中得到广泛的应用。我国已制定的有关圆钢管混凝土结构设计规范(规程)主要有中国工程标准化协会标准《钢管混凝土结构设计与施工规程》、国家建材工业局颁布的《钢管混凝土结构设计与施工规程》以及能源部颁布的《钢-混凝土组合结构设计规程》，此外中国工程建设标准化协会的《矩形钢管混凝土结构技术规程》也正在制定之中。然而，由于相关规范所采用的理论不同，我国制定的有关圆钢管混凝土的设计规程不尽相同。本节将我国建筑行业的有关钢管混凝土结构设计的规范和日本、美国、欧洲和英国的几本结构设计规范中有关钢管混凝土部分进行对比分析。

### 2.3.1 国内规范

中国工程标准化协会标准《钢管混凝土结构设计与施工规程》(CECS28:

90): 轴心受压短柱截面承载力  $N_0 = \varphi \varphi_e A_c f_c (1 + \xi + \sqrt{\xi})$ ，式中  $\xi = A_s f_y / A_c f_c$ ， $\varphi, \varphi_e$  分别为长细比和偏心率对承载力的折减系数。公式采用等效混凝土截面，计算时考虑了混凝土的约束效应。

国家建材工业局颁布的《钢管混凝土结构设计与施工规程》(JCJ01-89) 轴心受压杆件承载力设计值  $N = \phi (A_s f_y + K_l A_c f_c)$ ，式中  $\phi$  为钢管混凝土轴心受压杆件稳定系数， $K_l$  为核心混凝土轴心抗压强度提高系数。公式采用组合截面，混凝土与钢管的中性轴位置重合，考虑了混凝土的约束效应。

能源部颁布的《钢-混凝土组合结构设计规程》(DL5099-97): 组合材料的设计强度  $N \leq \phi A_c f_{ce}$ ，式中  $\phi$  为轴心受压稳定系数。公式采用等效混凝土截面，

考虑混凝土上的约束效应。

### 2.3.2 国外规范

日本 AIJ: 对方钢管,  $N_0 = A_s F_y + \gamma_{cu} A_c F_c$ , 对圆钢管,  $N_0 = (1 + \eta) A_s F_y + \gamma_{cu} A_c F_c$ ,  $\gamma_{cu}$  为混凝土强度折减系数,  $\eta$  为混凝土增强系数, 取  $\eta = 0.27$ , 公式采用组合截面, 混凝土钢管的中性轴不重合, 考虑了混凝土的增强作用。

美国 AISC: 等效钢截面 (计算抗压强度), 截面抗压承载力  $N_{cr} = \phi_c A_s F_{cr}$ ,  $\phi_c$  为折减系数,  $\phi_c = 0.85$ ,  $F_{cr}$  为等效应力强度; 不计混凝土的约束效应。

美国 ACT: 组合截面, 在 ACI 规范中, 强度的计算方法和钢筋混凝土的计算方法相同, 不计混凝土的约束效应。

欧洲 EC4: 组合截面, 混凝土部分的中性轴位置与钢的重合。对于矩形截面不考虑混凝土的约束效应,  $N_{pl} = \phi (A_s F_y / \gamma_s + A_c F_c / \gamma_c)$ , 式中  $\phi$  为轴向杆稳定系数,  $\gamma_s$ ,  $\gamma_c$  分别为钢和混凝土的材料安全系数。对于圆形截面, 当  $b \leq 0.5$  或  $M \leq ND/10$  时, (其中  $b^2 = N_{pl} / N_k$ ) 时混凝土部分乘以一个增大系数  $\beta$ ,  $N_{pl} = A_s F_y / \gamma_s + \beta A_c F_c / \gamma_c$ ,  $\beta$  与钢管混凝土强度、管径、长细比、管壁厚有关。

英国 BS5400: 组合截面, 混凝土中性轴的位置与钢的中性轴位置重合。对于矩形截面,  $N_0 = 0.91 A_s F_y + 0.45 A_c F_{cu}$ , 对于圆形截面,  $N_0 = 0.91 A_s F_y + 0.45 A_c f_{cc}$ 。用  $F_y$  代替  $F_y$ ,  $F_y' = C_2 F_y$ , 混凝土的修正强度  $f_{cc}$  代替  $F_{cu}$  来考虑约束效应,  $f_{cc}$  由下式求得:  $f_{cc} = F_{cu} + C_1 f_y t / D$  关。  $C_1 C_2$  为由等效长度  $L_k$  和直径  $D$  确定的系数, 如 2-1 表格给出

表 2-1

$L_k/D$	0	5	10	15	20	25
$C_1$	9.47	6.40	3.81	1.8	0.48	0
$C_2$	0.76	0.80	0.85	0.90	0.95	1

### 2.3.3 承载力分析

下面根据中国规范 (规程) 的计算公式对本次试验进行理论计算, 并与试验结果对比分析:

(1) 按《CECS28: 90》方法, 基本理论依据见蔡绍怀《现代钢管混凝土结构》一书, 主要依据钢管混凝土构件的试验结果, 以经验回归公式为主。

$$N_0 = A_c f_c (1 + \theta + \sqrt{\theta})$$

式中:  $N_0$ —轴心受压构件强度承载力;

$\theta = A_s f_y / A_c f_c$  为套箍指标;

$f$ —钢管材料的抗拉、抗压设计强度;

$A_s$ —钢管截面面积;

$f_c$ —混凝土抗压强度设计值;

$A_c$ —核心混凝土截面面积。

(2) 《JCJ01-89》方法, 基本理论依据见蒋家骅、汤关柝的《三向应力混凝土》一书, 借用混凝土结构设计理论的一些公式形式, 根据钢管混凝土构件的试验结果和理论分析建立起一套半经验半理论的计算公式和表格。

$$N_0 = f_y A_s + K_1 f_c A_c$$

式中:  $K_1$ —核心混凝土轴心抗压强度提高系数, 可由钢号、混凝土等级和含钢率查表得到;

(3) 《DL5099-97》方法, 基本理论依据见钟善桐的《钢管混凝土结构》一书, 采用统一理论, 即视钢管混凝土上为一种材料, 以建立在试验基础上的理论公式为主, 在公式形式方面更多地借鉴了钢结构的设计理论, 由于理论公式较繁, 更多地采用了表格的形式。

$$N_0 = A_{sc} f_{sc}', \quad f_{sc}' = (1.212 + B\xi + C\xi^2) f_{\alpha} \quad (\text{不考虑长细比及偏心影响})$$

$A_{sc}$  为钢管混凝土横截面面积,  $f_{sc}'$  为钢管混凝土轴压组合强度标准值,  $f_{\alpha}$  为

混凝土轴心抗压强度标准值;

$$\text{其中 } B = 0.1759 \frac{f_y}{235} + 0.974, \quad C = -0.1038 \frac{f_{\alpha}}{20} + 0.0309$$

$$\xi = \alpha \frac{f_y}{f_{\alpha}} \text{ 为套箍系数, } \alpha = A_s / A_c \text{ 为含钢率。}$$

$A_s$  为钢管横截面面积,  $A_c$  为混凝土横截面面积,  $f_y$  为钢材屈服值;

三本规范的计算结果由于公式推导思路不同而不同:

《CECS28: 90》认为钢管混凝土在本质上属于套箍混凝土, 由于钢管对核心混凝土的套箍作用, 使核心混凝土处于三向受压状态, 从而使核心混凝土具有更高的抗压强度和变形能力。据此, 采用极限平衡理论的方法推导出钢管混凝土轴压短柱的极限承载力计算公式。所取的轴心受压强度是极限承载力, 由截面的极限平衡导得, 即荷载应变曲线  $N-\varepsilon$  中的最高点, 由于钢管混凝土具有较好的塑性性能, 此时构件的应变值一般大于4%。而另两本规程则视钢管混凝土为塑性材料(类似软钢), 取屈服时的应力为强度值。

《JCJO 1- 89》认为钢管混凝土是钢管和混凝土组合而成, 在受力过程中互相拟制, 共同工作。通过大量试验得到钢管混凝土轴心受压短柱极限承载力是钢管的承载力加K;倍核心混凝土承载力之和。

《DL5099-97》规定:  $\varepsilon = 3000/\mu\varepsilon$  时为构件的塑性承载力, 即强度值。

《JCJO 1-89》则以钢管发展塑性、混凝土达到抗压极限作为轴心受压构件的塑性承载力,

其  $\varepsilon$  值一般稍大于  $3000 \mu\varepsilon$ , 所以它所计算的钢管混凝土设计强度略高于《DL5099- 97》计算的结果。

从计算公式本身来看, 《CECS28: 90》采用的是显式, 直接计算, 没有限制使用范围。《JCJO 1- 89》和《DL5099-97》计算公式采用了系数表达式, 系数的具体表达式较为繁琐, 所以以表格的形式直接给出, 因此实际应用时受应用表格范围的限制。如《JCJO1-89》中混凝土的强度等级只给出了C30, C40和C50, 若采用C60混凝土则无表可查。《DL5099-97》则根据近年来高强混凝土应用的趋势, 在《DLGJ5099-91》原有C30, C40和C50的基础上增加了C60的内容。

本次钢管混凝土短柱试验的试验值及理论值列于表2-3。从表上可以看出, 采用《CECS28: 90》规程计算的承载力最大, 采用《DL5099-97》规程计

算的承载力最小，而试验值比两种方法计算的理论值都要大，主要原因是《CECS28:90》规程采用的是极限强度理论，给出的是最大承载力，而《DL5099-97》规程采用的是弹塑性理论，以材料的塑性强度为其承载力。

钢管混凝土短柱试验

表2-2

	尺寸 (mm) D×t×L	混凝土强度 (MPa)	理论计算 承载力 I	理论计算 承载力 II	试验承载力
外钢管混凝土 短柱	140 × 2.8 × 485	32.5	780kN	926kN	1000kN
芯钢管混凝土 短柱	89 × 4 × 400	32.5	464kN	542kN	660kN

注：钢管混凝土的理论承载力I、II分别采用规程《DL5099-97》，《CECS28:90》的公式计算

## 2.4火灾作用下钢管混凝土结构的力学性能

### 2.4.1 研究概况

国内外学者对钢管混凝土在受火时的工作机理研究已取得了一系列重要成果，为进一步在该领域开展深入的研究工作创造了条件。由于组成钢管混凝土的钢管和其核心混凝土之间相互贡献、协同互补、共同工作的优势，使其具有优于钢结构的耐火性能，并且相对于钢结构可降低防火造价。在英、德、加拿大、卢森堡、日本和澳大利亚等国的研究者们对圆形和矩形截面的钢管混凝土在火灾下的力学性能进行了大量的理论分析和试验研究。并已制订了专门的设计规程。目前国际上钢管混凝土的主要设计规程有：美国的ACI31899，SSLC(1979)和LRFD(1994)；日本的AIJ(1980，1997)；欧洲的EC4(1996)；德国DIN18800(1997)等。但在进行钢管混凝土柱的抗火设计时，由于考虑到劳动力较为昂贵，因而大都采用在核心混凝土中配置专门为考虑防火而设的钢筋或钢纤维、或者通过降低柱子的轴压比以使构件达到所要求的耐火极限。

我国目前尚未制定关于钢管混凝土结构防火设计方面的规范，这不仅制约了钢管混凝土结构在公用和民用建筑中的推广应用，而且由此产生对已建或在建钢管混凝土结构建筑物的耐火等级的确定缺乏必要的科学依据，由

此造成了很大程度上的安全隐患。在已建成的建筑结构中，有的按照钢筋混凝土结构的规范要求外包混凝土进行防火，有的按照钢结构规范要求表面刷防火涂料可粘防火材料进行防火，这些方法虽然也可能保证结构的防火要求，但都相当保守，因而造成不必要的浪费，并且缺乏科学性和统一性，无法大范围推广。因此，深入研究钢管混凝土的耐火性能，并由此确定其防火设计方法。不仅具有重要的理论意义和经济价值，而且有着十分紧迫的实际应用的意义。

近年来，我国的科研工作者开展对圆形和方形截面的钢管混凝土结构的耐火性能的研究工作，研究工作主要从两个方面入手。一是研究钢管混凝土结构火灾下的力学性能，用于确定其耐火极限。为制订钢管混凝土的防火设计规范做准备工作；一是研究钢管混凝土结构火灾后的力学性能，用来确定钢管混凝土火灾后的残余承载力，为钢管混凝土结构火灾后的维修与加固提供理论依据。

国内哈尔滨建筑大学提出以“约束效应系数”为基本参数来描述钢管对其核心混凝土的约束，其表达式如下：

$$\xi = \frac{A_s f_y}{A_c f_{ck}} = a \frac{f_y}{f_{ck}}$$

式中： $A_s, A_c$ ，分别代表钢材和混凝土的截面积； $a = A_s / A_c$  为钢管混凝土截面含钢率； $f_y$  为钢材屈服强度； $f_{ck}$  为混凝土抗压强度。对于某一特定的钢管混凝土截面，约束效应系数可以反映出组成钢管混凝土截面的钢材和核心混凝土的几何特性和物理特性参数的影响。约束效应系数对钢管混凝土性能的影响主要表现在： $\xi$  值越大，在受力过程中，钢管可对核心混凝土提供足够的约束作用，混凝土强度和延性提高得就越大，也就是说， $\xi$  的大小可以很好地反映出钢管和混凝土的组合作用。以“约束效应系数”为基本参数可较准确地描述钢管混凝土截面的“组合作用效应”，同样也可以对钢管混凝土的防火性能进行定义。使进行钢管混凝土结构的设计得到简化。

#### 2.4.2 火灾作用下钢管混凝土结构的力学性能

随着钢管混凝土结构在高层和超高层建筑中日益广泛的应用，钢管混凝土

土结构的耐火设计和火灾后的修复加固工作显得愈发重要。民用建筑的防火要求与工业建筑有很大不同，民用建筑的防火首先要保证所用结构在一定火灾持续时间下保持良好的整体性，以给居住人员足够的时间逃离火场，这是关系到人的生命安全的问题。而且对遭受火灾后的建筑，是拆除重建还是通过维修和加固继续使用，这也具有十分可观的经济效益。

国内外学者已对钢管混凝土柱耐火极限进行了系统的研究，如 Kligsch(1985)；Hass(1991)，O' Meagher等(1991)；Lie和Stringer(1994)；Kim 等(2000)；Wang(1999)；Kodur(1999)；韩林海等(2000—2002)等。经过国内外学者多年的研究，由于组成钢管混凝土的钢管和核心混凝土在火灾作用时相互作用，共同工作的特点，使钢管混凝土具有比钢结构和钢筋混凝土结构更好的耐火性能。首先，由于核心混凝土的存在，使钢管在受火时的温度升高较单纯钢结构时的升温大为滞后，在温度升高的初期，钢管将吸收的热量传导给其内部的混凝土，混凝土在吸收了热量温度升高后，由于钢材在200℃左右时，强度略高于常温状态，混凝土在温度300℃以下时，强度基本不发生变化，并且因混凝土的自蒸过程和二次水化等综合作用，使混凝土硬化，抗压强度还有一定提高，同时产生的水蒸汽对钢管产生了降温作用，使得钢管混凝土结构的防火性能和耐火极限远远高于在同等火灾情况下的钢结构；同样，由于外部钢管的存在，使处于核心区域的混凝土在火灾高温状态下不发生表面爆裂。使高温下的混凝土整体性保持完好，即使混凝土因高温强度完全丧失，也会在外围钢管的约束作用下仍能承担一部分荷载，使得钢管混凝土结构的防火性能和耐火极限也高于同等火灾情况下的钢筋混凝土结构。其次，由于组成钢管混凝土的钢管和混凝土之间具有相互贡献、协同互补的特点，当温度升高时，两种材料共同工作，共同承担温度升高后造成的荷载分布的变化，能够发挥两种材料各自的优良性能。

基于上述认识，并结合“约束效应系数” (§)理论，首先确定组成钢管混凝土的钢材及混凝土的应力—应变关系模型，在此基础上采用纤维模型法，计算钢管混凝土构件在火灾作用下荷载—变形全过程分析关系曲线，和已有的国内外的实验结果进行对照。在理论分析和试验研究的基础上，发现构件的耐火极限主要与截面尺寸(圆截面为直径D，方截面为边长B)<sup>λ</sup>和长细比(圆构件： $\lambda = 4L / D$ ；方构件： $\lambda = 2\sqrt{3}L / B$ )以及防火保护层厚度(a)有关。

这样可方便地计算出一定耐火极限下构件所需的防火保护层厚度。通过对数值计算曲线的分析拟合，且适当考虑安全度，最终可给出钢管混凝土柱防火保护层厚度

a的简化公式如下：

$$\text{圆钢管混凝土: } a = (19.2t + 9.6) \cdot C^{-(0.28 - 0.0019\lambda)} \quad (2)$$

$$\text{方钢管混凝土: } a = (148.6t + 22) \cdot C^{-(0.42 + 0.00170\lambda)} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中，t为耐火极限(h)；C为柱截面周长(mm)； $\lambda$ 为构件长细比。保护层采用厚涂型钢结构防火涂料。比较发现，在相同条件下，钢管混凝土所防火涂料的厚度小于钢结构防火涂料的厚度，即降低了工程造价，又加快了施工进度。

高温作用后钢管混凝土的力学性能发生了很大的变化，而且这种变化是与钢管与混凝土的相互协同工作分不开的。所以，必须首先分别对钢材和混凝土受高温作用后性能发生的变化进行分析。对于钢管来说，一般认为高温后其力学性能基本恢复，屈服极限和弹性模量与常温相同或降低很少，应力—应变关系可类似于常温时的情况，可用理想弹塑性或硬化弹塑性的形式表示。而混凝土在温度较低时，强度下降不大，即使在高温状态下，也由于外部钢管的约束，仍保持良好的整体性。火灾后随着外界温度的降低，钢管混凝土结构已屈服截面处钢管的强度得到了不同程度的恢复，结构的整体性比火灾中有所提高。

在火灾后，钢管混凝土构件的强度可以根据外界条件的不同得到不同程度的恢复，结构的力学性能和整体性与高温状态时比有较大程度改善。而相同条件下钢结构或钢筋混凝土结构则不具备这种能力。钢结构在经历火灾后，普遍会因遭受超过界限温度的高温而造成结构失稳，使结构扭曲并产生较大的变形，即使在温度降低后结构强度也会一定程度的恢复，但建筑物的整体性已被破坏，无法通过维修继续使用；同样，钢筋混凝土结构在持续高温作用下，混凝土表面会产生裂缝，甚至发生爆裂，严重的会造成钢管与混凝土分离，使结构基本丧失承载力，即使在高温作用时间不长的情况下，有可能保持一定的整体性，但由于混凝土性质发生不可逆的化学变化，结构基本上不存在修复并继续使用的价值。而钢管混凝土则由于钢管和混凝土的协同互补、共同工作的优势。使经历火灾的钢管混凝土结构的强度和刚度能够大部

分恢复。结构完整性和可修性远远高于同等条件下的钢结构和钢筋混凝土结构。这不仅使得经历火灾的建筑结构的拆除重建率大大降低,具有十分明显的经济效益。而且对于结构的维修和加固补强的工作量大为减少,并在降低维修和加固费用的同时减少了自然资源的浪费,也具有十分明显的社会效益。

火灾后钢管混凝土压弯构件力学性能的理论分析和试验研究结果表明,火灾作用对钢管混凝土构件承载力的影响系数 $k_r$ (为考虑火灾作用影响时的承载力和常温下的承载力之比),主要是构件的受火时间( $t$ )、截面尺寸( $D$ )、构件长细比( $\lambda$ )和防火保护层厚度( $p_t$ )。通过对大量工程常用参数的数值计算分析,回归出按ISO-834规定的标准火灾曲线作用后钢管混凝土构件的 $k_r$ 计算公式:

圆钢管混凝土柱:

$$k_r = \begin{cases} (1 + 0.15t_0 - 2t_0^2 + 3t_0^3) \cdot f(D_0) \cdot f(\lambda_0) \dots (t_0 \leq 0.6) \\ (1 - 0.39t_0 + 0.095t_0^2) \cdot f(D_0) \cdot f(\lambda_0) \dots (t_0 \geq 0.6) \end{cases} \quad (4)$$

方钢管混凝土柱:

$$k_r = \begin{cases} (1 - 0.036t_0 - 0.59t_0^2) \cdot f(D_0) \cdot f(\lambda_0) \dots (t_0 \leq 0.6) \\ (1 - 0.46t_0 + 0.095t_0^2) \cdot f(D_0) \cdot f(\lambda_0) \dots (t_0 \geq 0.6) \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $t_0 = t/100$ ;  $D_0 = D/600$ ;  $\lambda_0 = \lambda/40$ ;  $f(D_0)$ 为构件截面尺寸影响函数; $f(\lambda_0)$ 为长细比影响系数。上述各式中,  $t$ 以分钟(min)计,  $D$ 以毫米(mm)计。

可见,只要给定钢管混凝土构件和火灾持续时间( $t$ ),即可利用式(4)~(5)方便地计算出构件的承载力影响系数 $k_r$ ,进而确定出火灾作用后构件的残余承载力。

## 2.5 钢管混凝土的徐变

### 2.5.1 基本理论研究概况:

钢管混凝土的徐变特性是由混凝土的徐变特性与核心混凝土和钢管之间的应力重分布两者相互作用的结果。由于混凝土的徐变机理非常复杂,影响因素众多且程度各异,不少学者就此提出过的粘弹性理论,渗出理论以及粘性流动理论等各种理论及假设还没有哪一种被普遍接受。也因为混凝土徐变过程的复杂性和不定性,以及引起的材料的非线性特性。使得所有关于混凝土徐变分析理论都不是既简单又精确的,而其相应的数学

模型也存在着一定的分歧和不确定性。应用于普通混凝土徐变研究的理论如：老化理论、先天理论、继效流动理论、弹性老化理论、按龄期调整的有效模量法等。对常用的钢管混凝土构件，在弹性工作阶段的最大载荷约为极限荷载的 70%~80% 左右，对大多数实际工程来说，使用荷载一般为极限荷载的 50%~60%。从而一般的都只对弹性工作范围内的钢管混凝土徐变特性进行分析。在外荷载作用下，钢管和混凝土都处于多轴应力状态，自然需要采用多轴应力状态下的混凝土徐变理论来描述钢管混凝土构件中核心混凝土的徐变。而继效流动理论由于能够较为全面地描述混凝土的构成，机理及混凝土在多轴应力状态下徐变的特点，能够细致分析混凝土徐变的组成因素，非常适合于计算像钢管混凝土构件中的核心混凝土这样处于卸载状态的混凝土的徐变，从而较多地被用于钢管混凝土相应徐变问题的计算。值得一提的是，叠加原理是继效流动理论的基础，那么该理论自然只适用于弹性工作阶段范围，以保证求解的精确可靠。现有的关于钢管混凝土徐变的计算都大多是基于 2 种材料粘接良好满足变形协调条件及平截面假定的基础上，进行公式推导并编程迭代计算。事实上这样一系列工作很繁琐，但相比而言在精度上就有一定的保证。一般说来，低应力时钢管混凝土的徐变与素混凝土的徐变呈线性关系，高应力时呈非线性关系。随着应力增大，由弹性向塑性阶段过渡，变形不断增加。钢管内的附加应力逐渐减小，但不管是在低应力还是高应力状态下，徐变对钢管混凝土的强度承载力均无影响。

### 2.5.2. 不同受力情况下钢管混凝土徐变研究状况

徐变特性是结构设计与施工控制中需要慎重考虑的问题。而混凝土徐变特性所产生的结构内力的变化亦是多年来大家讨论较多的问题，而有关混凝土在单轴应力状态、多轴应力状态下的徐变问题，国内外已有很多学者进行过较为深入的研究，并建立了有效模量法、徐变率法、按龄期调整有效模量法、继效流动理论等多种计算理论和方法。随着应用的进一步扩大，钢管混凝土构件的徐变问题的研究也提上了日程。

钢管混凝土在实际结构中主要用于受压结构。针对混凝土受力特点，一般地对计算模型进行了简化，以继效流动理论为基础，并提出了轴心受压短柱钢管混凝土的徐变计算公式。而事实上，由于制造偏差、轴心线的偏离等可能原因，理想的轴心受压状态几乎是不存在的。应用继效流动理论及多轴应力状态下混凝土的徐变理论，对偏心受压构件的力学特性和核心混凝土徐变进行了包括徐变模型、计算构件徐变的方法及徐变影响因素等做了一系列的研究工作。钢管混凝土小偏心受压构件的徐变在 1 年左右几乎停止，而且其徐变稳定阶段到达的时间比普通混凝土构件徐变要早得多，徐变量值也比普

通混凝土要小得多。对小偏心受压构件来说, 偏心率由 0.2 增加到 0.4, 构件的徐变量增加 60% 左右。应该说, 工程实践中这是一个不可忽视的数目针对钢管混凝土大偏心受压情况做过一些探讨, 得到了与实验数据良好吻合的徐变计算公式; 应该说, 偏心率是确定偏心受压构件工作性能的重要指标, 构件截面的应力分布也与偏心率有着直接关系, 对大偏心受压构件来说, 偏心率越大, 构件的徐变也就越大。在其它条件不变仅偏心率由 0.6 增加到 0.8 时, 构件的徐变量将增加 30% 左右。对比大小偏心引起的徐变量值的多少可知, 偏心率值对小偏心构件的影响更显著。根据钢管混凝土受弯构件的受力特点, 在继效流动理论的基础上, 对钢管混凝土受弯构件的徐变进行分析。已有了受弯构件的徐变计算公式。

在对不同受力状态下构件徐变特性分析的基础上, 目前对于承压状态下徐变对构件紧箍应力的影响及徐变引起构件截面应力重分布的问题也有了相关的研究。并且发现, 在承受偏心受压荷载的钢管混凝土构件中。其紧箍力与轴心受压构件的紧箍力是不同的。在偏心受压构件中, 由于截面上的应力分布不均匀, 紧箍力的分布也是不均匀的: 而通过对考虑和不考虑钢管对核心混凝土的紧箍作用 2 种情况的对比, 认为当核心混凝土上紧箍应力小于轴向应力的 5 % 时, 可以忽略紧箍力的作用。

### 2.5.3 影响钢管混凝土徐变的因素

徐变是混凝土在长期荷载作用下的固有特性。FURLONG 通过试验研究发现徐变对圆钢管混凝土柱的力学性能有较大影响, 这是较早的有关钢管混凝土构件徐变特性研究方面的报道。随后虽然国内外研究者进行了一系列相关的试验研究工作, 但至今现行的各国规范、规程等对此问题的处理还是存在着较大的差异甚至未有涉及。

对于普通混凝土而言, 影响徐变的内外部因素很多, 如: 水泥品种、细度; 各种附加剂; 集料品种、用量以及配合比; 混凝土强度、持续应力的大小; 水灰比; 混凝土加载龄期及结构尺寸; 环境温度, 湿度及养护条件等, 这些在以往的研究工作中都有不同的侧重就像上面所提到的, 由于钢管混凝土是一种组合结构, 其受力性能、结构强度以及稳定性等都与普通混凝土不同。因为结构的差异、养护条件的不同, 钢管混凝土中核心混凝土与普通混凝土所处的环境不一样, 影响因素及其影响的程度自然不同。一般说来, 考虑钢管混凝土徐变影响的因素主要有以下几个: 含钢率、应力级别、载荷, 核心混凝土标号等。具体结论如下:

(1) 当含钢率相同时, 徐变应变随着作用应力级别的增加而增加。

(2) 相同应力级别时, 含钢率的大小对徐变的影响不可一概而论。虽然含钢率的增

大会限制钢管混凝土徐变的发展,但相同的应力级别使含钢率较大的构件作用应力值要大。其结果将使混凝土的徐变增加,最终应该根据两者相互作用综合结果判断徐变的增大还是减小。

(3) 相同荷载下,含钢率越大,构件的徐变值越小。

(4) 钢管混凝土中,随核心混凝土标号的提高徐变有所增大,而标号越高,徐变增长幅度反趋缓慢。

值得注意的是,钢管混凝土随标号提高徐变增大的特性正好与普通混凝土构件随着混凝土标号的提高而减小相反。可以理解,混凝土标号越高,使得混凝土上分担的应力也相应地提高,虽然混凝土的弹性模量也增大,但后者影响相对要小,从而使得标号提高,徐变增大一般说来,核心混凝土构件徐变随标号提高而增大的量值是很小的,实践工程中可以酌情不予考虑。由此,在研究钢管混凝土徐变问题时,影响混凝土标号的一系列内部因素也可以忽略。

## 2.6本章小结

本章通过对钢管混凝土短柱的理论分析和试验研究,得出以下结论:

1. 钢管混凝土塑性性能良好,在进入塑性强化阶段后,强化段的变化规律与约束效应系数 $\alpha$ 有很大关系。

2. 钢管混凝土柱的承载能力不仅与混凝土强度、钢材的屈服强度有关,还与约束效应系数 $\alpha$ 有关,其理论计算承载力因为计算公式采用的推导方法的不同而有所差别:《CECS28:90》规程计算的承载力最大,采用的是极限强度理论,给出的是最大承载力;《DL5099-97》规程计算的承载力最小,采用的是弹塑性理

论,以材料达塑性强度为其承载力;试验值比两种理论计算的承载力都要大。

3. 通过本次试验研究及对国内外各规范的计算公式的对比分析,初步了解了采用各规范计算公式计算产生差异的原因,为节点试验验算钢管混凝土柱及节点承载力选择计算公式作了准备。

4. 钢管混凝土因为其合理的结构形式,更能适应现代工程结构向大跨、高耸、重载发展,这是结构工程科学的一个重要发展方向。进一步了解徐变对该结构的影响及变化规律,具有理论和实践的必要性。笔者以为,就钢管混凝土徐变情况研究而言,可以从下面几个方面加以努力。

(1) 不同文献从继效流动理论出发,经过变换得出不同的计算公式,对同一实验数

据进行处理所得的结论不尽相同。我们在考虑由于推导过程一系列的假定及计算误差外，还应顾及到继效流动理论本身是否能很好地适用于钢管混凝土：

(2) 现有研究大都只对弹性工作范围内的钢管混凝土的线性徐变特性进行分析，而在弹性工作范围内又不考虑钢管与混凝土之间的紧箍力作用，事实上，该结构特殊之处正在于钢管和混凝土之间的套箍作用大大改善了其工作性能，且已有极少数实验数据反映徐变引起的紧箍应力不容忽视：应该说，考虑混凝土的弹性后效及钢管混凝土结构组合材料约束的徐变特性，能更好地反映工程实际情况。

(3) 大量文献表明，钢管混凝土徐变在 1 年左右几乎停止，但通过  $e - lgt$  曲线从长时间（几十年）看，变形不会趋于水平，而是会上升。即钢管混凝土徐变会一直持续下去。

(4) 目前，还尚未看到有文献涉及考虑像加载龄期、持荷时间等因素对钢管混凝土徐变影响的内容，期望在工程实践中收集相关的资料加以整理分析。

(5) 对于普通钢筋混凝土，由于徐变引起过大反拱导致一系列的问题已引起了学术界及工程界的广泛关注，但钢管混凝土结构中徐变对挠度的影响研究还甚少，以后在这方面需要做更多的工作。

### 第三章 钢管混凝土节点及其施工工艺

#### 3.1 节点

钢管混凝土即钢管套箍混凝土是指在钢管中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过程中的相互作用，即钢管对核心混凝土的约束，使混凝土的强度得以提高，塑性、韧性大为改善；同时，由于核心混凝土的存在可以避免或延缓钢管发生局部屈曲，从而保证钢管性能得以充分发挥。钢管和核心混凝土的取长补短使钢管混凝土具有强度高、延性好、耐疲劳、抗冲击、易施工等优越性。因而，自1897年美国John Lally在圆钢管中填充混凝土作为房屋建筑的承重柱并获得专利以来，钢管混凝土结构得到了迅猛发展，成功应用于高层、大跨、重载和抗震防爆等工程中。而圆钢管混凝土柱与方钢管混凝土柱相比具有套箍作用强，受压时径(宽)厚比可以较大等优点而倍受青睐。本文将介绍分析圆钢管混凝土柱钢梁框架中研究和使用较多的节点型式，并提出简洁合理的新型节点型式，以完善圆钢管混凝土柱钢梁结构体系的节点设计。

##### 3.1.1 节点设计不同思想

钢管混凝土柱钢梁结构体系的迅猛发展急需研究开发合理有效的节点型式，但由于日、美等同对钢管混凝土柱钢梁框架的认识不同导致了节点设计思想的不同。在日本，钢管混凝土柱钢梁结构被认为是钢筋混凝土结构中钢梁取代传统的钢筋混凝土框架梁的一种变革，具有以下优势：

- 1) 钢梁和压型钢板配合使用节省了楼盖混凝土的模板；
- 2) 可加大梁跨度来增加可使用的空间；
- 3) 采用现场预制或工厂预制构件能加快施工进度，降低施工成本；
- 4) 减小结构高度，减轻楼盖自重。减少地基反力，降低地震作用，对增加结构承载力和延性也极其有利。而在美国却恰恰相反，钢管混凝土柱钢梁结构被视

为建筑钢结构中钢管混凝土柱代替钢柱的一种延伸，具有以下优点：

- 1) 钢管混凝土柱延性好，承载力高，且可不限轴压比，与钢柱截面尺寸相同，能够明显增加结构的整体刚度，减小侧向位移；
- 2) 防锈蚀和抗火性能好；
- 3) 用钢量减少，降低工程造价；

4)施工方便,缩短了工期,特别是泵送混凝土技术的发展,其优势更为显著。

### 3.1.2 节点型式介绍

梁柱节点的不同设计思想必然带来节点构造处理风格的迥异。在日本,钢管混凝土柱钢梁框架节点主要采用柱贯通(Through Column)式,即钢梁不得整体连续穿过钢管混凝土柱,而是通过一些构造措施使钢梁连接在柱侧的设计方案;而在美国,则主要采用梁贯通(Through Beam)式,即钢梁连续穿过钢管混凝土柱的设计方案。下面将简要介绍圆钢管混凝土柱钢梁结构体系的一些常用节点型式。

#### 3.1.2.1 柱贯通式节点

##### 3.1.2.1.1 柱贯通式简单节点

圆钢管混凝土柱贯通式节点一般采用钢梁截面焊接在钢管混凝土柱侧的连接型式。图1为柱贯通式节点的简单型式。1994年美国Northridge地震和1996年日本Kobe地震中钢框架梁柱焊接节点开裂和脆性破坏严重。此类节点的缺陷也就得到了广泛关注。其缺陷主要表现在:

1)在梁柱连接处应力集中严重,而该处截面又最为薄弱,翼缘焊接特别是下翼缘现场焊接作业难度高,质量难以保证,又很难对焊缝缺陷进行检查,因而焊缝容易存在隐患,如裂缝、欠焊、熔化不足或不良、夹渣及气孔,由于梁端腹板下翼缘处工艺孔偏小,使下翼缘焊缝施焊时实际中断;

2)连接部位钢材的三向受力容易导致脆性破坏;

3)梁腹板上施焊工艺孔几何形状不当和施焊的衬板都容易引起应力集中效

应。因此,在梁柱连接处翼缘焊缝很容易开裂,裂缝的出现将导致节点刚度和强度显著下降。另外,翼缘与柱表面直接焊接,容易造成钢管柱壁在梁翼缘拉力作用下的局部变形较大。为了解决上述问题,一般采用钢梁塑性铰外移法,即加宽梁端翼缘或狗骨式连接。

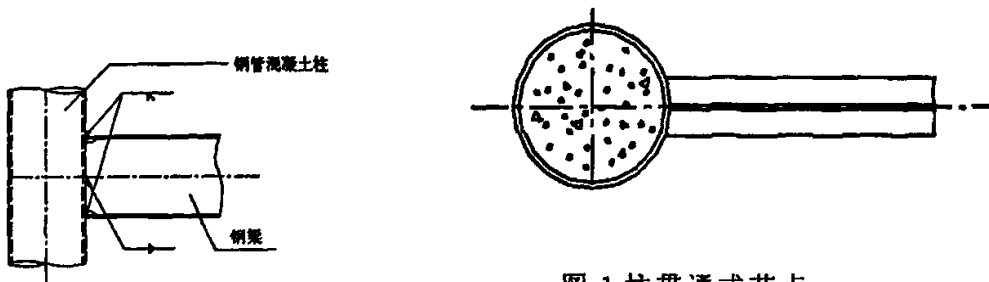


图 1 柱贯通式节点

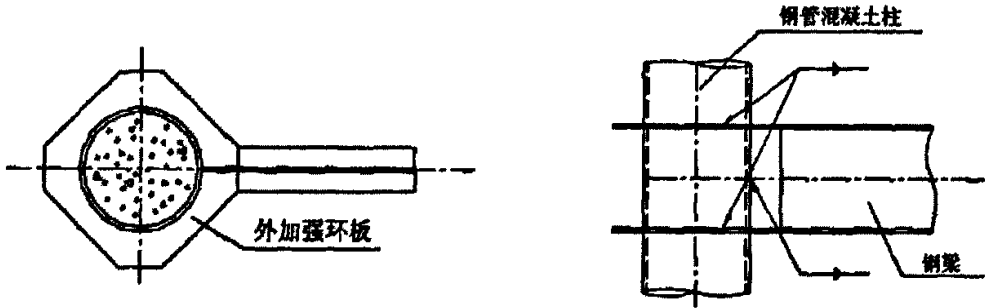


图2 外加强环式节点

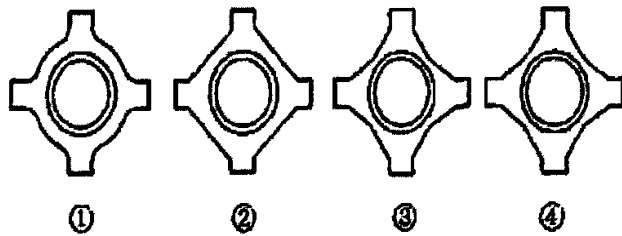


图3 加强环板的型式

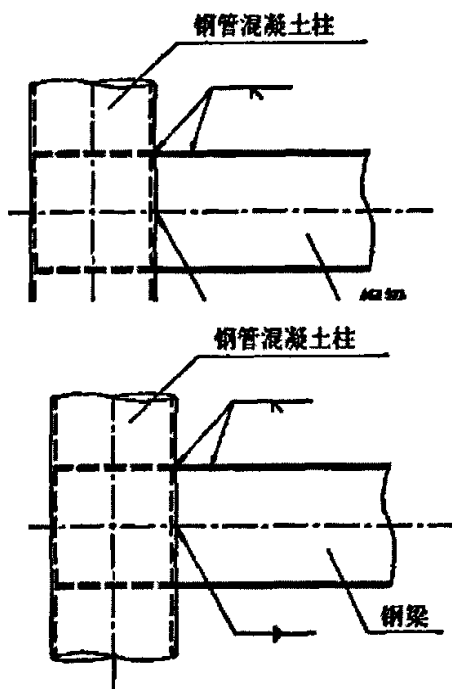
### 3.1.2.1.2 外加强环式节点

外加环式节点是《钢管混凝土结构设计与施工规程》(CECS28: 90)所推荐使用的节点型式之一,也是迄今为止,研究最成熟,应用最多的一种节点型式。它是钢管混凝土柱在梁的上下翼缘位置设上下加强环,与梁熔透焊缝连接后,传递梁端弯矩,同时在上下环间焊一竖板,用角焊缝与钢管柱表相连,通过高强螺栓或焊接方式与梁腹板相连以传递梁端剪力的节点型式。加强环的宽度和

厚度皆应与钢梁相同(如图2)。其中加强环有四种型式(如图3): ① 型环板内力分布较均匀, 应力集中较小, 但加工困难; ② 型环板加工方便 但应力集中严重; ③ 型是②型的改进型, 应力集中有所改善; ④ 型是① 型的改进型, 受力合理, 应用较为普遍。这种节点传力可靠, 施工方便, 加强环有利于翼缘拉力梁柱间的有效传递, 减小柱壁的局部变形, 截面设计实现“强柱弱梁, 节点更强”后具有良好的抗震性能, 但用钢量大, 节点在实用中适应性和灵活性较差, 一般用于钢管混凝土柱直径较小的情况。在高层建筑的边角柱上外加强环可能与围护结构相冲突而采用半加强环式, 其承载力、刚度及其抗震性能都有所降低。

### 3.1.2.1.3 内加强环式节点

当柱钢管直径大于1m时, 一般采用内加强环式节点。钢管混凝土柱和钢



管柱内焊接加强环(如图4)。此种节点用钢量减少, 但翼缘板和内加强环的高度与节点区柱壁板处在较大的焊接热影响区, 且各方向梁的高度或标高不同时难以处

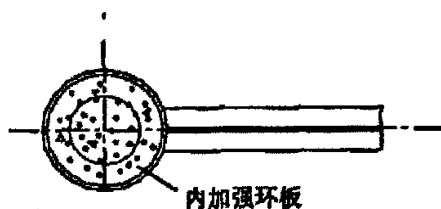


图4 内加强环式节点

### 3.1.2.1.4 锚定式节点

钢管混凝土柱和钢梁连接时, 在正对钢梁上下翼缘位置, 在管柱内焊接T型锚板, 埋于管内混凝土中, 以承受翼缘传来的拉力(如图)。其中, T型锚固件由垂直板和竖板组成。梁翼缘的拉力经焊缝传给钢管, 又经管内同一位

置的坡口焊缝传给锚固件，锚固件挤压核心混凝土，有效的传递了梁翼缘的拉力，减少柱壁局部变形。这种节点的刚性比内加强环式节点小，但构造简单，节省钢材，适合大管径小拉力情况。

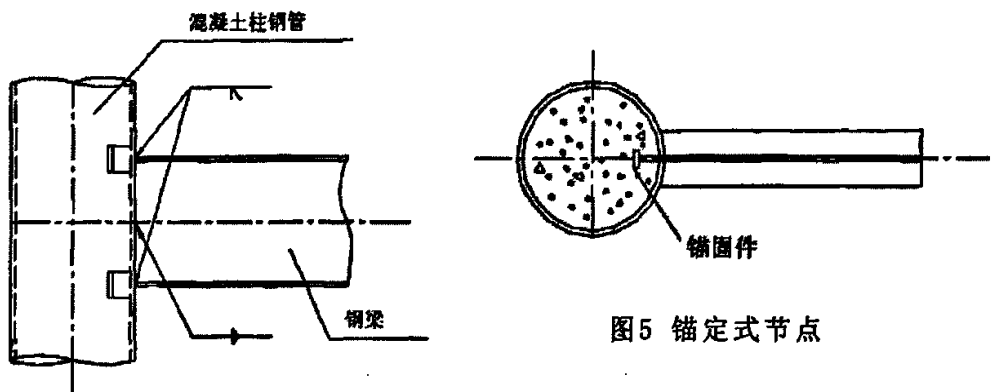


图5 锚定式节点

### 3.1.2.1.5 十字板节点

十字板节点是在钢管柱内设置十字加劲板以提高节点的整体刚度和承载力，其节点型式如图6。这种节点的整体刚度较大，但耗钢量大，管内施焊不便，同时十字板影响核心混凝土的浇注与振捣，而且钢管壁受焊接热的影响大，容易在反复荷载下开裂而降低整体承载力。

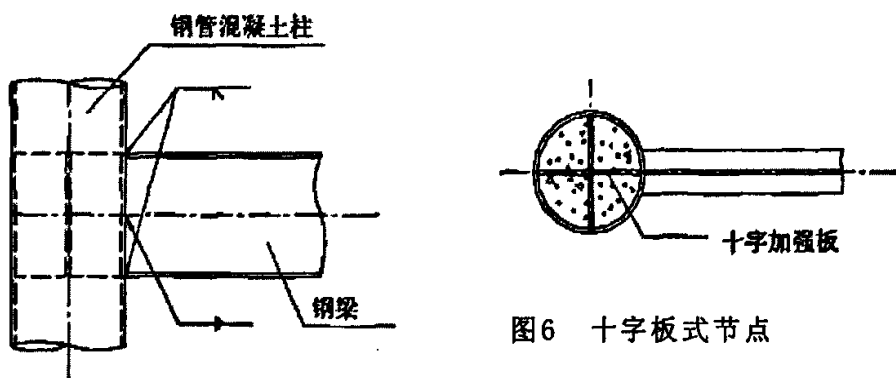


图6 十字板式节点

### 3.1.2.2 梁贯通式节点

#### 3.1.2.2.1 梁整体贯穿式节点

梁整体贯通节点是指钢梁整体直接连续通过柱截面的节点型式(如图7),与柱贯通节点相比,保持了梁的连贯性,具有以下优点:

- 1)减少了在最大弯矩处的焊接量和节点加工量,也就减少了焊接带来的相关问题,也避免了因梁端焊缝开裂引起的强度过早下降;
- 2)使得梁端部无须再设施焊工艺孔,避免或减少了因工艺孔引起几何不规则而产生的应力集中;
- 3)有利于拉力和剪力的有效传递减少了钢管柱壁在梁翼缘拉力作用下的局部变形;
- 4)节点具有较高的整体刚性和强度,耗能性能好,试验证明中柱的截断容易造成上下柱对准困难,在1995年阪神地震中出现了柱与横隔板焊缝处的断裂.梁下翼缘和横隔板焊接热影响区的断裂,施焊工艺子L范同内梁下翼缘和横隔板

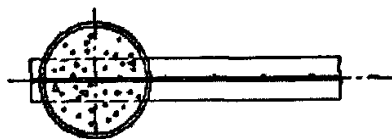
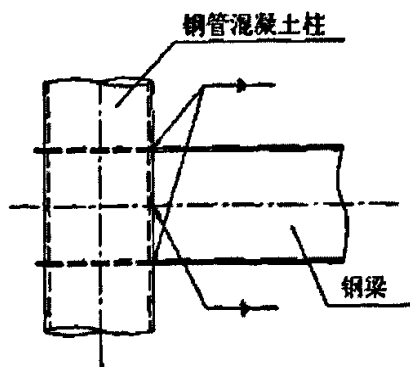


图7 梁整体贯通式节点

#### 3.1.2.2.2 梁翼缘贯通式节点

鉴于梁整体穿过柱时对柱界面影响较大,而采用钢梁的上下翼缘直接或间接通过柱截面,而腹板焊接于柱表面的连接型式,即梁翼缘贯通式节点(如图8),这种节点能够较好实现梁端弯矩的传递,对柱截面削弱有所改善,但仍有较大影响.基于以上缺点,有人提出在翼缘上加焊钢筋(如图9),再把钢筋锚固到柱内混凝土中,能有效的传递梁翼缘拉力,减少了柱截面削弱,又可以减少柱钢管的局部变形.试验证明此种节点中钢筋穿过孔对柱的影响较小,是一种理想的节点型式.另外,日本还采用一种内隔板外伸连接的节点型式,即柱在横隔板处截断,隔板伸出柱外与梁翼缘相连,然后隔板与柱重

新焊接，这样，虽然对柱的加工变得复杂，但是梁和柱隔板直接连接起来，有利于力的传递其中隔板可以外形如图3，但隔板仅在中央留小子L以浇灌混凝土之用。这种做法

中柱的截断容易造成上下柱对准困难，在1995年阪神地震中出现了柱与横隔板焊缝处的断裂。梁下翼缘和横隔板焊接热影响区的断裂，施焊工艺子L范同内梁下翼缘和横隔板的断裂等破坏：。

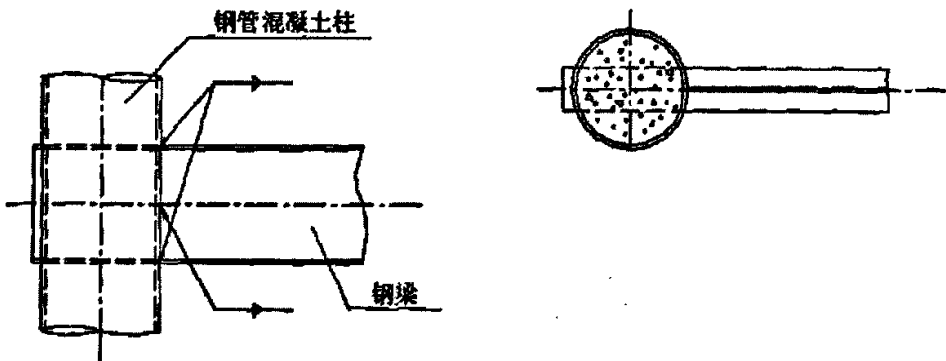


图8 梁翼缘贯通式节点

### 3.1.2.2.3腹板贯通式节点

钢梁的腹板连续通过钢管混凝土柱，而上下翼缘焊接到柱表面的一种节点型式(如图10)。这种节点是对梁整体贯通式节点的一种改变，减少了梁翼缘对柱核心混凝土的浇灌与振捣的影响。剪力传力可靠，施工较为简单。但较梁整体贯通式节点而言刚性和承载力降低较大。另外，钢梁翼缘焊缝处开裂后，受焊接热影响变脆后的腹板同样容易开裂。

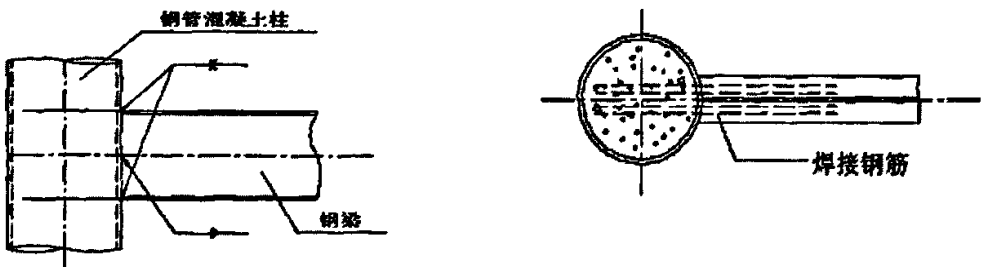
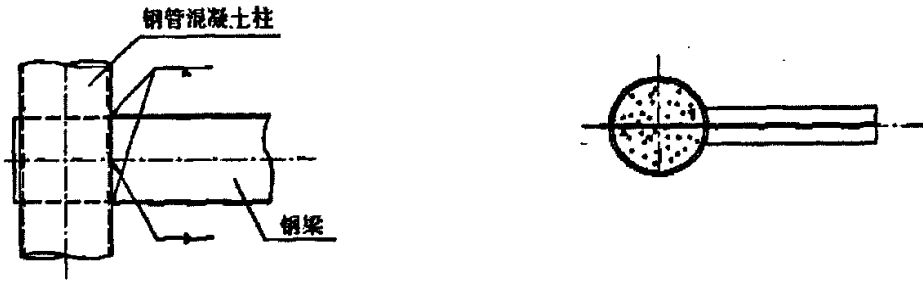


图9 梁翼缘焊接钢筋贯通式节点



10 梁腹板贯通式节点

### 3.1.3 新型节点型式的提出

通过介绍分析常见的圆钢管混凝土柱钢梁框架的节点型式，不难发现，现有的柱贯通节点大量采用焊接，而焊缝在地震作用下具有脆性破坏的明显缺点；梁贯通节点由于梁的贯通却对柱截面有很大削弱，而且对核心混凝土的浇灌振捣也有影响。为了克服以上节点的缺点，我们提出了采用端板螺栓连接的新型节点型式。端板用坡口焊与梁端相连，用高强螺栓与钢管柱相连，具体如图”。柱采用焊接带竖向直肋或横向弧形肋的钢板找平。所有焊接在工厂完成，减去了现场焊接带来的诸多问题。节点的施工工艺如下：

- 1) 找平圆钢管柱，定位成螺栓孔；
- 2) 定位钢管柱，利用高强螺栓将钢梁端板和钢管柱连接好；
- 3) 对高强螺栓进行防粘结处理，浇灌柱内混凝土；
- 4) 混凝土达到一定强度时，对高强螺栓进行张拉。梁长误差可以通过将钢梁制成稍短于柱距，再在端板和找平钢板间加垫钢板调节。这种节点刚性和强度较高，传力简单可靠，能较好的实现梁柱间拉力的有效传递，并且可以省去柱内对应梁上下翼缘处的加劲肋，避免焊接节点时钢管壁的局部变形。节点施工方便易行，有利于缩短工期，保证节点质量，而且柱上安装不同高度和标高的梁的处理比较简单，合理设计后能很好的实现“强柱弱梁，节点更强”的抗震设计理念。另外，因避免了现场焊接也就提高了结

构在寒冷地区的可施工性。

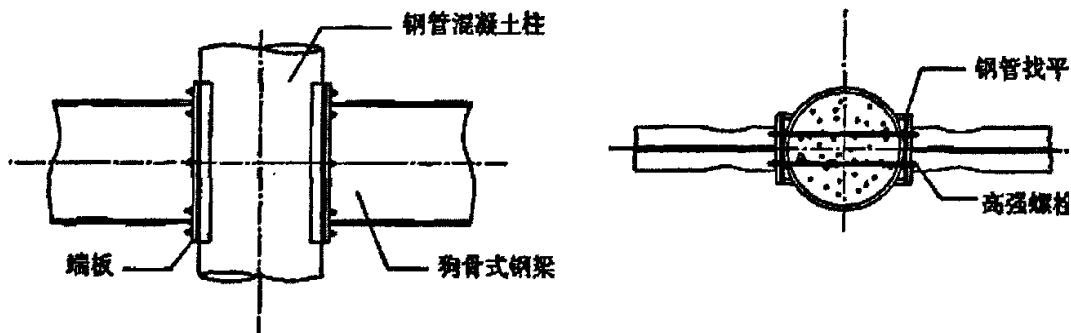


图11 端板螺栓连接节点

### 3.1.4 技术经济分析

从已建的高层和超高层建筑来看，钢管混凝土结构具有较好的综合经济效益，这主要体现在钢管柱与钢筋混凝土柱相比，可以减小截面面积，增加使用面积，而且施工方便，特别是可以采用逆作法施工，大大缩短工期。从已有的文献资料来看，目前有关钢管混凝土结构的经济分析大都只是针对某一具体工程而言，对在该工程中采用不同的结构，例如对钢管混凝土结构和钢管混凝土结构进行面积利用率、用钢量、混凝土量及模板用量等的对比分析，所得的结果缺乏普遍性，需要研究人员做出更为深入细致的研究对比分析。

在高层建筑中，钢管混凝土柱结构体系的性能明显优于一般钢筋混凝土结构体系，从技术角度看是一种非常合理的选择。

## 3.2 高层建筑工程钢管混凝土施工工艺

3.2.1 施工工艺流程：钢管柱制作—钢管柱柱脚定位环板及附件安装—钢管柱的现场安装—钢管混凝土柱环梁施工—钢管混凝土施工。

### 3.2.2 钢管柱制作

钢管柱要求各部件的制作、焊接尺寸、位置、标高必须准确。为减少现

场工作量，保证质量，钢管及内衬管、环形封顶板、抗剪环箍、柱脚定位环板及螺栓配件等制作、组焊集中在工厂内完成，经检验合格运至现场安装。

### 3.2.3 钢管柱的拼接组装

1) 构件除锈、防腐处理：钢管柱制作完成后外表面进行手工除锈处理，表面除锈等级为Sa2，外表面涂富锌防锈漆两度，共厚100 $\mu$ m，钢管柱内表面涂纯水泥浆两道。

2) 钢管的长度，可根据运输条件和吊装条件确定，一般以不长于12 m为宜，也可根据吊装条件，在现场拼接加长。

3) 钢管对接时应严格保持焊后肢管的平直，焊接时，除控制几何尺寸外，还应注意焊接变形对肢管的影响，焊接宜采用分段反向顺序，分段施焊应保持对称。肢管对接间隙宜放大0.5 mm~ 2.0mm，以抵消收缩变形，具体数据可根据试焊结果确定。

4) 焊接前，对小直径钢管可采用点焊定位；对大直径钢管可另用附加钢筋焊于钢管外壁作临时固定，固定点的间距可取300 mm 左右，且不得少于3点。钢管在焊接过程中如发现点焊定位处的焊缝出现微裂缝，则该微裂缝部位须全部铲除重焊。

5) 为确保连接处的焊接质量，可在管内接缝处设置附加衬管，其宽度为20mm，厚度为3mm，与管内壁保持0.5mm的膨胀间隙，以确保焊缝质量。

6) 对接焊施工补充措施：现场对接焊采用人工焊，接口焊缝为熔透二级焊缝，分次满焊。为减少焊接变形引起的钢管柱垂直度偏差，采取如下补充措施：

(1) 每根柱从下至上固定焊工，以明确责任；(2) 对称施焊，即分段反向对称顺序进行施焊；(3) 严格控制同类型焊机及焊接电流等参数；施焊后及楼面板浇筑后，由于应力作用，钢管柱的轴线会发生一点偏移，每次吊装钢管柱前，应先进行测量，并记录好钢管柱的轴线偏移量，钢管柱校正时对照前段钢管柱偏移值，在规范允许的垂直度偏差(L / mm)范围内反向纠偏，对接前根据上节柱安装偏差值，计算后在管口实行机械打磨，保持焊缝间隙基本一致，以保证钢管柱的轴线偏差控制在规范允许的范围内。

7) 钢管构件必须在所有焊缝检查合格后，方能按设计要求进行防腐处理。吊点位置应有明显标记。

### 3.2.4 钢管柱的吊装安装

### 1) 吊装设备与方法

现场吊装用5013塔吊，单根柱最大重量2.2 t，塔吊起重量能满足要求，起吊方法采用钢丝绳捆绑抗剪环箍垂直起吊。

### 2) 钢管柱柱脚定位环板及附件的定位校正及安装：

安装前先清理预埋钢板面，按柱安装方向(与柱身划线方向吻合)划出十字线，在线上标出柱半径，在底板钢筋铺设完成，各轴线及标高检查正确无误后，用塔吊将定位器吊到安装位置，并粗定位。

在环形钢板定位器上弹出纵横轴线及钢管柱外边框线。定位器吊装就位后，其轴线与地面轴线基本对齐，其高度与安装标高基本对准后，用6 $\phi$ 5的螺纹钢分两排将3支调节螺栓固定，然后用调节螺栓调节定位器高度，使得筒节上的标高检验线与预定标高相吻合，再移动定位器，待定位器轴线与地面轴线相吻合(吊线检验)，拧紧螺母将定位器固定，检验无误后，用一些短钢筋将定位器与桩基钢筋固定，保证定位器在浇筑混凝土时不会发生移动。

3) 钢管柱组装后，在吊装时应注意减少吊装荷载作用下的变形，吊点的位置应根据钢管柱本身的承载力和稳定性经验算后确定。必要时，应采取临时加固措施。

4) 吊装钢管柱时，用铁皮将其上口遮盖严密，以免异物落入钢柱内。

5) 钢管柱安装及校正：钢管柱垂直度的校正，采用吊线法校正，然后用经纬仪复检的方法同时进行。

钢管柱吊装就位后，调柱外皮与柱半径标点重合后，用去除钉帽的铁钉衬于钢柱与环板之间调节垂直度，使钢管柱上下端的十字轴线对齐，调整柱身划线与预埋钢板划线重合用铁尖、铁码将上下筒节壁板调平且保证2mm的缝隙，用千斤顶调整钢管柱的垂直度及标高，所有尺寸符合规范要求后，两个焊工对称沿环向点焊(8个点)将钢管固定。报验合格后，方可施焊。

### 3.2.5 钢管混凝土柱环梁钢筋的制作安装与施工

钢管混凝土柱环梁的施工是结构施工的关键，环梁钢筋绑扎速度直接影响结构工期。环梁骨架钢筋可在施工现场完成，也可在工厂完成，骨架制作前先制作环筋成型模具。由于环梁和框架梁钢筋直径较大，最粗钢筋直径为 $\Phi$ 32，框架梁钢筋在环梁内必须打弯锚固，且每根钢管混凝土柱同时连接3根以上的框架梁，环梁箍筋多而密，给环梁的钢筋绑扎带来了很大的困难，为此

采取了以下措施：

### (1) 制作环梁环形钢筋尺寸成型模具

环梁环形钢筋尺寸成型模具是在10mm厚钢板上按实际尺寸放出环梁环形钢筋大样，在不同半径圆环钢筋的两侧焊若干长度约4cm的  $\Phi 25$ 短钢筋。该模具可同时制作多个不同半径的圆环钢筋。

### (2) 环筋成型

环筋成型分两次完成，第一次：先将直筋一端插入模具，然后由2人沿模具转动钢筋，使其250mm长度形成弧状。(250mm是按  $\Phi 5$ 钢筋的10倍考虑的，即为单面搭接焊的长度值)。第二次：将其从模具上取出来，再将另一端插入模具，先由2人沿模具，转动此筋，另1人用撬棍往下压，以阻止钢筋上翘，当转动到剩余度达1/3时，将钢筋插入一根  $\Phi 48$ 、 $L=1800$  mm的钢管内，用于增大力臂，然后再推动钢筋和钢管沿模具转动，直到两端相交为止。在不松动的同时由焊工将接头处点焊3点，然后再均匀地从模具上将环筋撬出来，为控制环筋焊接受热后变形，制作一个特殊的卡具。卡具的使用方法为：利用预压反弹原理，即先将点焊好的环筋安放在卡具上，并预压一定的值，使其有意变形成椭圆状，焊好后再反弹回来正好满足要求。经试验和实践得出，用卡具下压钢筋时，对于  $\Phi 20$ 钢筋下压40mm，对于  $\Phi 25$ 钢筋下压30 mm，焊完停5 min~6 min松开卡具，即可反弹回来。

### (3) 环梁骨架钢筋成型

环梁钢筋骨架成型时，为方便环梁钢筋的就位和绑扎，采用钢管搭设钢筋加工架，用以确定环梁钢筋的立体空间位置。将焊好的已经制作成型的环筋与箍筋分别套在两个马凳和4  $\Phi 48$ 钢管搭设的加工架上，大中小箍筋均匀放置，为便于框架梁带弯钩的钢筋锚入环梁骨架中，环梁腰筋暂不绑扎就位，先临时吊绑在上层环筋下。先绑扎上排环筋，然后绑扎下排环筋，环梁腰筋待吊装就位后将框架主筋穿入时再绑扎。制作完毕的环梁钢筋应固定牢固可靠，保证吊装过程不变形。

### (4) 支环梁及框架梁底模

为方便环梁钢筋骨架安装，以利于框架梁钢筋锚入环梁骨架筋中，采用将环梁及框架梁模板分两次支设的方法，即第一次先将环梁底模和框架梁底模支设好，第二次待其钢筋安装后再支侧模。

### (5) 环梁钢筋骨架安装

用塔吊将环梁骨架分别套入每根钢管柱上，并放在环梁底模上，随即在底模上垫好钢筋保护层垫块。为控制抗剪筋与环梁箍筋之间有20mm的空隙，采用4个木楔均开打入钢管柱与环梁之间。

### (6) 环梁钢筋笼的安装

环梁处底模支设完毕后即可进行钢筋笼的吊装，吊装时将两条钢丝绳对称穿在钢筋笼两侧，吊装处箍筋与主筋应全部点焊加固，吊装过程保持钢筋笼的水平放置，放置稳妥后检查有无松动的箍筋及钢管抗剪筋与环梁箍筋的间隙尺寸，而后绑扎环梁腰筋，对每根环梁上连接的所有框架梁钢筋，要同时协调进行钢筋排放的绑扎。

### 3.2.6 钢管内混凝土的浇筑

钢管混凝土的特点之一是它的钢管就是模板，具有很好的整体性和密闭性，不漏浆、耐侧压。在一般情况下，钢管内部无钢筋骨架和穿心部件，钢管断面又为圆形，因此，在钢管内进行立式浇筑混凝土就比一般钢筋混凝土容易。但是，对管内混凝土的浇筑质量无法进行直观检查，其浇筑质量必须依靠严密的施工组织、明确的岗位责任制和操作人员的责任心。研究表明，影响钢管柱核心混凝土粘结强度的主要因素为柱截面形式、混凝土龄期和强度、钢管径厚比、长细比以及混凝土的浇筑质量等，其中以混凝土浇筑质量影响较为明显。该工程钢管柱核心混凝土设计等级为CA5。钢管混凝土的浇筑采用立式手工浇筑法，振捣采用插入式加长振捣棒。

1) 该工程采用立式手工浇筑法：混凝土自钢管上口灌入，用振捣器捣实。管径大于350mm时，采用内部振捣器(振捣棒或锅底形振捣器等)。每次振捣时间不少于30 S，一次浇筑高度不宜大于2m。当管径小于350mm时，可采用附着在钢管上的外部振捣器进行振捣。外部振捣器的位置应随混凝土浇筑的进展加以调整。外部振捣器的工作范围，以钢管横向振幅为不小于0.3m为有效。振幅可用百分表实测。振捣时间不少于1 min。一次浇筑的高度不应大于振捣器的有效工作范围的2m~3m柱长。此法所用混凝土的坍落度宜为20mm~40mm，水灰比不大于0.4，粗骨料粒径为10mm~40mm。

2) 混凝土的配合比至关重要，除需满足强度指标外，尚应注意混凝土坍落度的选择。混凝土配合比应根据混凝土设计等级计算，并通过试验后确定。

3) 钢管内的混凝土浇筑工作, 宜连续进行, 必须间歇时, 间歇时间不应超过混凝土的终凝时间。需留施工缝时, 应将管口封闭, 防止水、油和异物等落入。

4) 每次浇筑混凝土前(包括施工缝), 应先浇筑一层厚度为100 mm~200mm的与混凝土等级相同的水泥砂浆, 以免自由下落的混凝土粗骨料产生弹跳现象。

5) 当混凝土浇筑到钢管顶端时, 可以使混凝土稍溢出后, 再将留有排气孔的层间隔板或封顶板紧压在管端, 随即进行点焊, 待混凝土强度达到设计值的50%后, 再将横隔板或封顶板按设计要求进行补焊。有时也可将混凝土浇筑到稍低于钢管的位置, 待混凝土强度达到设计值的50%后, 再用相同等级的水泥砂浆补填至管口, 并按上述方法将横隔板或封顶板一次封焊到位。

6) 管内混凝土的浇筑质量, 可用敲击钢管的方法进行初步检查, 如有异常, 则应用超声波检测。对不密实的部位, 应采用钻孔压浆法进行补强, 然后将钻孔补焊牢固。

#### 7) 钢管混凝土施工缝处理

施工缝设在距钢管上端500mm处, 可避免由于焊接受热时, 引起钢管柱内混凝土受损, 每次浇混凝土前铺设200mm厚与混凝土等强的砂浆层, 混凝土浇至管顶清除浮浆层至坚硬混凝土面覆盖养护。

#### 8) 钢管混凝土泌水空鼓现象的处理

泌水: 钢管的密闭性使混凝土中水分无法析出, 加上振捣棒在狭管内振捣, 粗骨料相对下沉, 砂浆上浮至管顶, 在管顶形成砂浆层和泌水层。

空鼓: 混凝土在硬化过程中的收缩导致管壁与混凝土粘结不紧密。

为消除以上现象的发生, 必须采取以下措施:

1) 商品混凝土坍落度控制在 $(120 \pm 20)$  mm之间。在混凝土中掺12% UEA膨胀剂和减水剂, 采用塔吊吊运浇筑。

2) 一次投料振捣高度不超过1.5 m, 用混凝土体积控制高度, 振捣时间经混凝土面无气泡泛出为准, 设专人监控。

3) 合理安排混凝土浇筑工序, 确保每次核心混凝土的连续浇筑。

### 3.3 钢管混凝土施工中的配合比

#### 3.3.1. 研究内容

考虑钢管混凝土的具体特点和施工要求，而又能以自由落体法取代顶升法，能极大地简化钢管混凝土的灌注工艺，并能保证混凝土的内在质量。

由于采用自由落体法浇注钢管混凝土，所以混凝土除了具有补偿收缩性能外，还应有自流平、自密实的特点，为便于浇注，要求混凝土坍落度大、和易性好、不泌水、不离析，同时为充分发挥钢管箍作用，要求混凝土的收缩率小，填充饱满，但坍落度大，和易性好，一般通过增大用水量来保证，而用水量增大后混凝土强度会下降、易离析、混凝土收缩量加大。因此要达到这些要求，要依靠外加剂来解决。

为满足混凝土强度和坍落度、和易性的要求，实践上一般采用UNF-5型缓凝型减水剂，以降低用水量，减小水灰比，增大混凝土的流动性，提高混凝土的强度和耐久性。

钢管内混凝土的填充程度对钢管极限承载力影响很大。据有关文献记载，空隙率越大，混凝土强度降低就越大，因此管内混凝土的密实度必须得到充分的保证。

为保证钢管内混凝土的密实性，减小混凝土的收缩系数和空隙率，在混凝土中掺入了膨胀剂UEA，它能使混凝土早期产生适度膨胀，中后期仍保持微弱的膨胀势头，并能产生一定的自应力，不断填充混凝土空隙，改善混凝土空隙的结构，提高混凝土的密实度，UEA的掺量一般为12%—16%（内掺法）。

为保证钢管混凝土不振捣，自由落体施工状态下能够具有自流平，自密实的特点，参考在混凝土施工的成功经验，在混凝土中适量掺入抗分散剂NDC，使之具备上述特点。

具体要求：

(1) 钢管拱混凝土设计强度为C40，试配强度为48MPa，限制膨胀要求 $3 \times 10^{-4}$ ，水灰比0.4~0.45。

(2) 20℃~30℃ 温度下混凝土初始坍落度不小于220mm，扩展度大于500mm。1h后坍落度不小于180mm，扩展度不小于450mm。

(3) 混凝土初凝时间不小于10h。

(4) 试配时混凝土试件成型不应振捣。钢管拱混凝土配合比要以满足设计和

施工要求为原则，混凝土本身的耐久性、均匀性、粘聚性应优于普通混凝土，为保证混凝土的质量，通过对当地材质的分析对比，选择较好的原材料进行了混凝土配合比的设计。

### 3.3.2. 混凝土配合比的选择

#### 3.3.2.1 原材料

水泥：普通硅酸盐525 水泥。

砂：中砂，细度模数2.5，含泥量2.0%。石子：碎石，5~20mm连续级配，含泥量0.8%。

减水剂：UNF-5缓凝型高效减水剂，减水率12%，掺量为水泥用量的0.5%~1.0%。

膨胀剂：特种建树厂U型膨胀剂，掺量为水泥用量的12%~16%，采用内掺法抗分散剂：树脂厂NDC，液体。

试验配合比

项目	混凝土配合比	30℃坍落度 (mm)		30℃坍落度 (mm)		凝结时间 (h)		抗压强度 (MPa)	
		初始	1h后	初始	1h后	初凝	终凝	3天	28天
混凝土类型	C:S:C:W:UEA:UNF-5:NDC								
A	1:1.42:1.99:0.45:0.00:0.000:0.0	210	180	510	320	12:11	15:30	28.6	48.6
4									
B	1:1.44:2.01:0.40:0.13:0.008:0.0	220	210	580	555	12:16	15:37	30.2	53.1
5									
C	1:1.40:1.96:0.43:0.14:0.008:0.0	242	212	535	491	12:42	15:47	29.1	51.6
6									
D	1:1.39:1.90:0.45:0.16:0.000:0.0	253	237	616	551	12:59	16:0.4	27.6	47.7
7									

从表1试验结果看，不掺UEA、UNF-5的其1h后扩展度损失较大；掺减水剂、抗分散剂和不同UEA掺量的混凝土B、C、D其拌和物的和易性均良好，坍落度

均满足要求。由于UEA为内掺法，其掺量对混凝土拌和物的性能影响不大，但混凝土早期强度有所降低。

试件外观质量评定

项目	初始入模		1h入模		1.5h入模	
混凝土类型	√	×	√	×	√	×
A	9	0	2	7	0	9
B	9	0	9	0	5	4
C	9	0	9	0	3	6
D	9	0	9	0	4	5

注：所有试件均没振捣

每种配比均留了3组9块试块“ ”边角饱满，“×”边角有缺陷。

从表上看，没有振捣的混凝土试件，由于掺加了抗分散剂NDC，初始入模的混凝土试块，拆模后各边角均饱满顺直，没有缺陷。1h后入模的混凝土试件，拆模后除A组大部分边角出现缺陷外，B、C、D各组混凝土试件与初始入模的情况一样，1.5h后人模混凝土试件(需重新搅拌)大部分试件外观均不理想，可见混凝土从出仓到人模时间不应超过1h，保险起见不应超过40min。

### 3.3.2.2配合比的调整确定

通过对各项产品性能研究及现场试验，我们还发现NDC具有一定的缓凝减水作用，对UNF-5掺量可适当降低。

考虑到混凝土在现场生产，运输距离很短，混凝土从搅拌到入模一般不超过25min，并可根据混凝土的灌注速度随时调整产量，我们确定了最后配合比。

钢管混凝土配合比

水泥.. (kg)	砂 (kg)	石 (kg)	W/C	LEA (kg)	NDC (kg)	UNF-5 (kg)
453	647	970	0.4	67	26	4.16

坍落度

初始 (mm)		1h后 (mm)		凝结时间 (h)		抗压强度(MPa)	
坍落度	扩展度	坍落度	扩展度	初凝	终凝	3天	28天
230	580	200	540	12:30	16:00	35.8	51.2

限制膨胀率

限制膨胀率 ( $\times 10^{-4}$ )				
1d	3d	7d	14d	28d
0.7	1.2	2.8	3	2.8

从表3. 4. 5试验结果来看, 加入了UNF-5和NDC后, 不但满足了混凝土的设计强度, 而且混凝土的和易性、均匀性也能达到预期效果, 混凝土的扩展度和凝结时间也比较理想, 能够满足钢管拱混凝土的施工要求

### 3.3.3 混凝土现场试验

正式配合比确定后, 我们在现场做了一试验段进行模拟灌注, 试验段长4.0m, 呈抛物折线, 用12mm厚钢板焊接, 截面为40x 40cm, 中间不设灌注孔, 底部封闭, 混凝土从上口灌入, 不施加振捣, 7天后将底部、中部、顶部各锯开两个断面, 经验查, 6个截面中央及边角混凝土均饱满密实

### 3.3.4. 钢管混凝土的质量控制

钢管拱混凝土施工正值秋季开始浇注。每片拱肋的混凝土100m<sup>3</sup>。为保证拱肋在浇注过程中均匀受力, 采用两台泵车对称泵送。因上下钢管与中间腹板互不相通, 所以将灌注孔分别布置在上管顶部腹板和下管侧部, 每灌注孔为一个单元, 由下向上逐段进行, 辅以振捣, 直至柱顶顶。

具体做法为: 先灌注下管, 完成后封焊该处灌注孔, 再进行该单元腹板混凝土的灌注, 灌满后封焊灌注孔, 再移至单元上圆管处, 依次类推, 灌注孔封焊时

要点焊, 留少量缝隙, 便于泌水排放, 待混凝土强度达到设计强度50%后再进行补焊, 钢管混凝土拱顶处的混凝土最容易发生不密实, 所以, 在其最高

处加

焊一节溢流管，混凝土的灌注高度必须达到柱顶以上方能停止，以保证柱顶混凝土的密实。为避免混凝土离析，混凝土自由落体落差不宜太大，在本工程中限制在一个灌注孔范围内。

每片拱肋历时10h一次灌注完成，泵送时的混凝土坍落度均大于180mm。在现场制作的混凝土试件同条件养护下7d的抗压强度为42MPa，28d标准养护抗压强度分别为56.1MPa、54.0MPa。

为使该桥钢管拱泵送混凝土施工顺利进行，保证其内在质量，结合模拟现场试验情况，制定了混凝土施工质量控制注意事项。

- (1)各种原材料进场必须符合相应的标准及规范。
- (2)泵送混凝土集中搅拌时，原材料称量要准确，UEA、UNF-5、NDC有专人负责投料，并派有专人监督。
- (3)混凝土搅拌时间严格控制在3min，达到搅拌均匀。
- (4)现场搅拌随时进行稠度抽查。
- (5)根据原材料的变化随时进行配合比的调整。

### 3.3.5 钢管混凝土质量检测

管内混凝土的灌注，因其外表有钢管包裹，因此给检验评定混凝土质量带来了一定难度，虽然我国制定了《混凝土和钢筋混凝土超声规程》(CECS21:90)，但钢管混凝土检测规程还没发行，如想采用超声波检测，必须在相同条件下作多种模拟试验，包括完全密实型、各种缺陷型的试验，相应总结出对应超

声波形、频率等数据。这种方法可靠性不是太高，所以我们采用最原始的，就目前来说也是最可靠的方法：人工锤击法。如锤击声音沉且哑，表明混凝土已

填充饱满。反之则表明有缺陷。

钢管混凝土浇注完成后，我们对柱子进行了大面积的随机锤击，锤击的取点方法是：中柱，每个断面10个点，柱脚1.5m范围、柱顶1.5m范围内作为重点每隔50cm 锤击一个断面，每共锤击1090个点。边拱肋每个断面4个点，拱脚4m范围、拱顶10m范围内作为重点每隔50cm锤击一个断面。其他段每米锤击一个断面，共锤击3643个点。经检查管内混凝土基本上饱满密实，个别不

密实的地方大部分在柱顶处，采取的补救方法是钻孔，用同配合比的水灰比压浆进行补强，压浆后将钻孔补焊牢固。锤击情况见下表：

钢管混凝土质量检测结果

锤击次数	中柱			边柱		
项目	柱脚	柱顶	其他短	柱脚	柱顶	其他短
合格	328	405	1558	265	327	745
不合格	2	5	2	2	3	1
合计	330	410	1560	267	330	746
总计	2300			1343		

钢管混凝土柱的灌注，成功地采用了自由落体法，极大地优化了钢管混凝土灌注工艺。经实测检查，钢管柱内部混凝土饱满密实。工程实践的成功不仅完善积累了钢管混凝土施工工艺及经验，也对钢管混凝土施工及流动性混凝土，做了大量的调查研究，并在试验基础上进行了有益的尝试。为今后工程积累了许多宝贵经验。此项研究达到了预期的目的。

## 第四章 钢管混凝土结构经济对比分析

### 4.1 概述

钢—混凝土组合结构是近年高层和超高层建筑中推广应用的新结构形式之一，它可充分发挥钢材和混凝土材料的特性，具有施工简便、工期短、结构性能好、材料用量省等优点，该结构按其组合方式又可分为4种，即钢管混凝土结构、钢—混凝土组合梁、外包钢组合结构和劲性钢筋混凝土结构等。其中，钢管混凝土结构是在钢管中充填混凝土而制成，具有承载力高、抗震性能好、节约钢材和施工简捷等优点，尤以钢管混凝土柱构件的表现最为突出，因而在高层和超高层建筑中得到日益广泛的应用，今后将成为高层和超高层建筑中较主要和实用的结构形式。

在高层建筑中，钢管混凝土柱结构体系的性能明显优于一般钢筋混凝土结构体系，从技术角度看是一种非常合理的选择。其优点具体表现如下：

(1)在荷载条件和钢材用量大致相同的情况下，钢管混凝土柱截面仅为钢筋混凝土柱的30%~40%，从而增大了建筑物的有效使用面积，在公共建筑大厅或车库中采用其优势更为突出；

(2)具有良好的结构延性。与普通钢筋混凝土大偏心受压构件相比，钢管混凝土柱的延性可提高几倍甚至十几倍，抗震性能也更优越；

(3)结构自重轻。有利于减小地基荷载，减弱地震影响，相当于抗震设防烈度降低一级；

(4)现场工作量大大减少，有利于加快施工进度，缩短工期；

(5)梁板与柱可采用不同强度等级的混凝土，避免节点施工上处理困难。

下面通过钢管混凝土结构的典型案例进行经济对比分析。

### 4.2 典型案例的经济对比分析

#### 4.2.1 福建泉州邮局大厦

这是我国第一个应用钢管混凝土结构的高层建筑

该大楼地下一层，地上15层，总高87.5米，为框架剪力墙结构体系。大楼的地下一层和地上两层营业大厅共三层的8根的柱采用了钢管混凝土结构，不但缩小了柱子的截面面积，增加了使用空间，满足了建筑方面对地下车库和营业大厅的要求。由于只需吊装空钢管和浇灌混凝土，不需装拆模板和绑

扎钢筋，远比钢筋混凝土柱的施工简便，从而大大缩短了工期，取得了良好的经济效益。

8根钢管柱的截面为 $\Phi 800 \times 10\text{mm}$ ，采用Q235钢材。内填C30混凝土，10米长，它与当采用轴压比控制为0.65时的普通钢筋混凝土方形柱的经济分析对比见下表4-1。

表 4-1 两种柱（10m长）的经济分析对比

结构类型 对比项目		钢筋混凝土	钢管混凝土
截面积	( $\text{m}^2$ )	1.5129	0.5027
	(%)	100	33.4
用钢量	(t)	2.63	2.34
	(%)	100	89
混凝土量	( $\text{m}^3$ )	15.13	4.78
	(%)	100	31.6
模板用量	( $\text{m}^2$ )	49.2	0
	(%)	100	0

对比这两种方案可知，每10米长的钢管混凝土可节约混凝土 10.35吨，约68%，节约钢材 0.29 吨，11约%，柱子截面减小约67%

#### 4.2.2 山西太原和信商场

和信商场工程位于太原市长风大街以北，铁十七局以东，地下2层，地上5层，建筑面积约6.7万 $\text{m}^2$ 。结构中每层设有44根钢管柱，钢管柱生根于基础桩承台，收口于+24.3 m结构处。钢管柱的截面为 $\Phi 900 \times 16\text{mm}$ ，采用Q235钢材，内填C30混凝土，柱长25米。它与当采用轴压比控制为0.65时的普通钢筋混凝土方形柱的经济分析对比见下表4-2

表 4-2

两种柱（10m长）的经济分析对比

对比项目 \ 结构类型		钢筋混凝土	钢管混凝土
截面积	( $\text{m}^2$ )	1.702	0.6362
	(%)	100	37.4
用钢量	(t)	3.9	3.47
	(%)	100	89
混凝土量	( $\text{m}^3$ )	17.02	6.36
	(%)	100	37.4
模板用量	( $\text{m}^2$ )	52.2	0
	(%)	100	0

对比这两种方案可知，每10米长的钢管混凝土可节约混凝土 10.66吨，约62%，节约钢材 0.43吨，12.4约%，柱子截面减小约62%

#### 4.2.3 深圳赛格广场大厦

深圳赛格广场占地面积 9653  $\text{m}^2$ ，地上 72 层，其中裙房 10 层，地下 4 层，深 19.5m，总建筑面积 169459  $\text{m}^2$ ，屋顶停机坪标高 291.60m，建筑总高 353.80m，采用圆形钢管混凝土柱结构，是目前世界上同类型结构中最高的建筑物。

赛格广场大厦地下室84.00m×85.20m，基础为一桩一柱的大直径人工挖孔桩，地下室外墙为0.80m厚地下连续墙；裙房72.00m×72.00m，层高5m，裙房屋面标高为49.6m，地下室和裙房均为12.00m×12.00m柱网的框架剪力墙结构。

塔楼位于裙房的东北角，采用框筒结构，其轴线方向与裙房成45°角，平面呈40.50m×40.50m正方形切角后的八边形，标准层高3.7m。矩形核心筒21.30m×19.10m，由每边8根钢管混凝土柱和钢裙梁组成壁框式筒身。4角柱钢管直径 1.10m，中间柱钢管直径0.8m，管壁均为14mm。核心筒内在两个主轴方向各设4条劲性混凝土剪力墙，剪力墙厚0.4m。外框架由4根钢管混凝土

边柱及核心筒柱相连的钢梁组成。外框柱的钢管直径及壁厚由下而上为1.6m、 $t=28\text{mm}$ ,

1.5m、 $t=26\text{mm}$ , 1.4m、 $t=24\text{mm}$ , 1.30m、 $t=22\text{mm}$ 。

所有钢管柱、钢梁、钢桁架及其连接板均采用国产16Mn钢, 核心筒剪力墙型钢骨架均采用国产Q235钢。钢管内柱混凝土等级为C60和C50。核心筒内剪力墙混凝土强度等级为C60、C50和C40。地下室底板, 地下室各层及首层楼面混凝土强度等级为C40, 其余各层楼面混凝土强度等级均为C30。

表4-3列出了在同等承载力的条件下的两种结构形式的柱的经济分析对比, 由表中可见, 采用钢管混凝土柱, 使截面积减小了约60%, 而大厦的使用面积增加了约3000 $\text{m}^2$ , 具有可观的经济效益。

表4-3 两种柱10m长的经济分析对比

结构类型 对比项目		钢筋混凝土	钢管混凝土
截面积	( $\text{m}^2$ )	5.28	2.01
	(%)	100	38.07
用钢量	(t)	0.83	1.09
	(%)	100	131
混凝土量	( $\text{m}^3$ )	5.28	2.01
	(%)	100	38.07
模板用量	( $\text{m}^2$ )	9.20	0
	(%)	100	0
柱自重	(kN)	132	57.66
	(%)	100	43.68

由于大厦的全部柱子(包括内筒柱)都是钢管混凝土结构, 所有在施工时可以采用全逆作的施工方法(图4-1)。

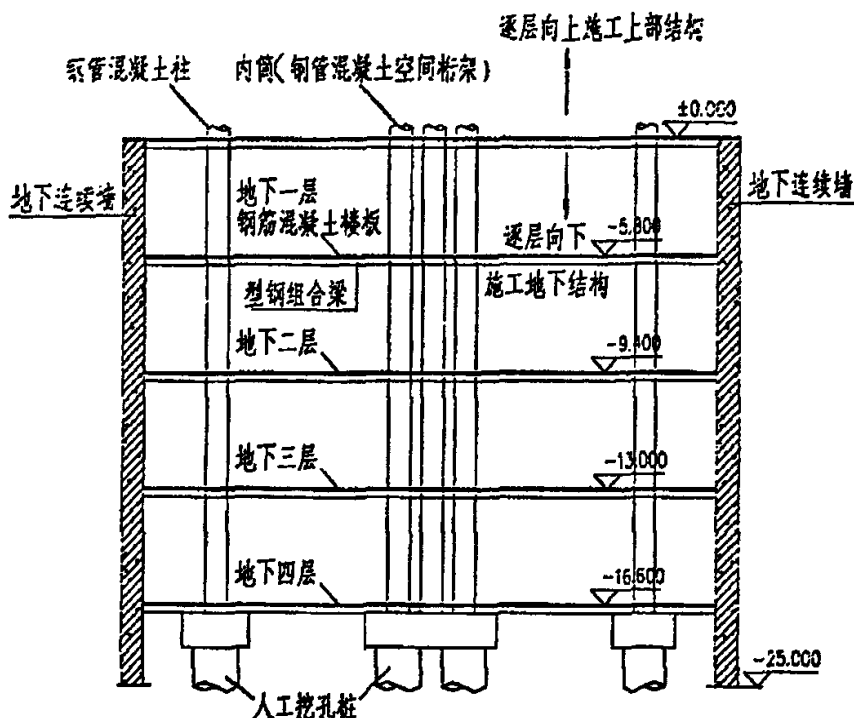


图4-1 全逆作法施工过程示意图

采用全逆作法不但可以缩短工期，节省支撑费用，而且从该大厦的实际情况来看，非常必要这是因为大厦的建筑场地位于深圳市繁华的中心地带，周围有多

栋高层建筑，特别是距离电子配套楼的条形基础仅有0.8米，而且两面临街，施工场地十分狭窄，工程地质条件又非常复杂。为了满足施工期间既要保证周围多栋基础对沉降变形非常敏感的建筑物的正常使用，又要不影响周围交通的要求，如若采用常规的施工方法，必须采取特别的措施，这样一来，不但费用高，而且时间长。实践证明，采用全逆作法进行施工不但很好的解决了以上的这些问题，而且节省了大约1200万元的支撑费用，缩短工期6个月。

#### 4.2.4 广州滨江明珠高层商住楼

该工程位于广州市海珠区滨江东路，地上29层，地下2层，建筑高度110.9米，总建筑面积44266平方米。其中1~3层为商场，4层为架空层，5~29层

为住宅，地下室用作停车用途。该工程采用框架—剪力墙结构体系，其中2~4层采用25根钢管混凝土柱，以解决停车库和商场柱截面尺寸大的问题。经对普通钢筋混凝土柱和圆钢管混凝土柱两种方案进行经济对比分析，认为使用圆钢管混凝土柱造价适中且工期短，不但可增加使用面积178平方米，且使得停车库和商场建筑功能更加合理，综合效益显著。

#### 4.2.4.1 设计条件

(1)以相同承载力 $3.2 \times 10^4 \text{ kN}$ 为前提，钢管混凝土柱为  $\Phi 800 \times 16 \text{ mm}$ ，C60混凝土，按环梁节点设计；普通钢筋混凝土柱按框支柱设计，截面 $1.3 \text{ m} \times 1.3 \text{ m}$ ，C60混凝土，控制轴压比0.7。

(2)套用广东地区2003年建筑工程预算价格表，按二类工程下浮5%计算，其中钢管、钢筋、混凝土价格参考施工期间(2004年第4季度)《广州地区建设工程材料指导价格》并结合市场价套用。人工按一至三类工分别为30，28，25元/工日计算。

#### 4.2.4.2 经济对比分析

##### (1) 环梁节点钢管混凝土柱

① 钢材： $A_s = 4\pi(800^2 - 768^2) = 39048 \text{ mm}^2$ ， $G_1 = 7.85 \times 390.48 \times 10^{-6} = 0.309 \text{ t/m}$ ，按

5500元/m计，则约1700元/m；

② 混凝土： $A_c = 4\pi \times 768^2 = 463247 \text{ mm}^2$ ， $V = 463247 \times 10^{-6} = 0.463 \text{ m}^3/\text{m}$ ，按414.5元/ $\text{m}^3$ 计，则为192元/m；

③ 钢管壁20mm厚M20柱网砂浆防火层： $V = \pi \times 0.8 = 2.513 \text{ m}^2/\text{m}$ ，按15.8元/ $\text{m}^2$ 计，则为39.7元/ $\text{m}^2$ ；

④ 钢管壁30mm厚混凝土防火层： $V = \pi \times 0.84 = 2.64 \text{ m}^2/\text{m}$ ，按8.6元/ $\text{m}^2$ 计，则为22.7元/m；

⑤ 环梁节点：分摊到每延米柱，为327元/m。

经计算， $\Sigma(①+②+③+④+⑤) = 2280.9 \text{ 元/m}$ 。

(2)普通钢筋混凝土柱(最小配筋率纵筋1.2%，箍筋1.8%，全长加密)

① 钢材：纵筋 $1.3 \times 1.3 \times 1.2\% \times 7.85 = 0.159 \text{ t/m}$ ，按4300元/t计，则为683.7元/m；箍筋 $683.7 \times 1.8 / 1.2 = 1025.5 \text{ 元/m}$ ，造价为1709.25元/m；

②混凝土： $V=1.3 \times 1.3=1.69\text{m}^3/\text{m}$

，按 $414.5\text{元}/\text{m}^3$ 计，则为 $700.5\text{元}/\text{m}$ ；

③模板： $S=1.3 \times 4=5.2\text{m}^2/\text{m}$ ，按 $18.74\text{元}/\text{m}^2$ 计，则为 $97.4\text{元}/\text{m}$ ；

④20mm厚砂浆抹灰层：按 $8.18\text{元}/\text{m}^2$ 计，则为 $42.5\text{元}/\text{m}$ 。

经计算， $\Sigma(①+②+③+④)=2549.65\text{元}/\text{m}$ 。

#### 4.2.4.3 综合经济效益分析

(1)钢管混凝土柱与普通钢筋混凝土结构相比，可降低工程造价约 $268.75\text{元}/\text{m}$ ，按每层 $4.8\text{m}$ 、6层共25个计算，则为19-35万元；

(2)圆钢管混凝土结构减小了地基承载，节省一定的基础施工费用(此处不作具体计算分析)。

(3)采用钢管混凝土结构，可增大实用面积，

$(1.3 \times 1.3 - \pi \times 0.4^2) \times 6\text{层} \times 25\text{个} \approx 178\text{m}^2$ ，按 $1\text{万元}/\text{m}^2$ 计，则可增加收益约178万元

综上所述，本工程采用钢管混凝土结构可减少工程费用近200万元，综合经济效益相当明显。钢管混凝土柱截面仅为钢筋混凝土柱的30%~40%，从而增大了建筑物的有效使用面积，在公共建筑大厅或车库中采用其优势更为突出。

#### 4.3本章小结

本章列举了四个应用钢管混凝土结构的高层建筑实例，针对四个实例，对钢管混凝土与钢筋混凝土这两种结构进行了经济方面的分析对比。

工程实践表明，钢管混凝土与钢结构相比，在保持自重相近和承载力相同的条件下，可节省钢材50%，并节省大量的焊接工作；与普通钢筋混凝土相比，在保持钢材用量相近和承载力相同的条件下，构件的横截面积可减少一半，从而使建筑空间得到加大，混凝土和水泥用量以及构件自重相应减少50%，可大幅节省建筑材料(钢材、水泥、木材等)用量。另外，钢管混凝土本身的施工特点符合现代施工技术工业化的要求，钢管混凝土柱施工时不需模板支撑，混凝土不需振捣，因而施工方便，可节省人工费用和缩短工期，降低工程造价。

由于钢管混凝土结构具有以上优势，同时又具有很强的相容性，因此它

通常用于高层建筑以受压为主的构件中以取代相应的钢筋混凝土结构或钢结构构件。这种结构可以解决高层建筑中的“胖柱”问题和高强混凝土的脆性破坏问题；也可以在钢结构体系中取代钢柱，以减少钢材用量和减轻风振动，还可以减少材料造价，提高经济效益高层建筑中采用钢管混凝土结构已为广大工程技术界所接受，越来越显示出它在高层和超高层建筑中的竞争力。可以预见，在不远的将来，钢管混凝土结构在高层建筑中的应用将会有更快的发展。

## 第五章 结论与展望

### 5.1 结论

钢管混凝土利用钢管和混凝土两种材料在受力过程中的相互作用，即钢管对混凝土的约束作用使混凝土处于复杂应力状态之下，从而使混凝土的强度得以提高，塑性和韧性性能大为改善。同时，由于混凝土的存在可以避免或延缓钢管发生局部屈曲，可以保证其材料性能的充分发挥，另外，在钢管混凝土的施工过程中，钢管还可以作为浇筑其核心混凝土的模板，与钢筋混凝土相比，可节省模板费用，加快施工速度。总之，通过钢管和混凝土组合而成为钢管混凝土，不仅可以弥补两种材料各自的缺点，而且能够充分发挥二者的优点，这也正是钢管混凝土组合结构的优势所在。

建筑结构的改革越来越倾向于利用现有的建筑材料，创造出性能更优越，具有更多功能的组合材料和结构构件，以达到进一步减轻结构自重，节约材料和简化施工工艺的目的。钢管混凝土就是这样一种由普通混凝土填入薄壁圆形钢管内而形成的组合材料。由于其具有承载力高，延性好和施工方便等优点，近年来已作为一种主要的结构体系迅速发展。

本论文通过实例验证了对下部中柱采用钢管混凝土柱取代常规的普通钢筋混凝土柱，不仅减小了柱截面，减轻结构的自重，增加了建筑的有效使用面积，而且提高了结构的抗震性能，加快了工程的施工进度。

经分析比较，工程采用钢管混凝土柱比用钢筋混凝土柱截面减少一半以上，混凝土用量及构件自重均减少约一半，同时可增加使用面积约达3%，这对通信设备布置要求比较规范整齐，各机架间线路联系非常紧密的通信建筑来说，效果是很可观的。它不仅提高了机房的使用效率，增加设备安装的能力，同时也减少了各设备间线路连接的长度，节约通信线路建设的成本，降低运营费用和故障发生率，经济效益十分显著。由于采用圆形柱，在机房内进行维护时视线也比方柱好，比较美观，受到使用部门的好评，反映较好。

由于工程使用的钢管由工厂直接加工，不仅保证了钢管的加工质量，减少现场工作量，而且因钢管混凝土柱施工时减少了支模、拆模、脚手架搭设等工序，大大缩短了施工工期。除前二层施工因需要对图纸及钢管检验有一个熟悉过程和组织不太得当工期有所延长外，其余各层施工工期较普通钢筋

混凝土结构层平均缩短约二天。

钢管混凝土柱本身受力比较明确，其承载力的计算比较容易，而由于本工程采用的穿心牛腿十环梁的新型节点形式，通过对钢管混凝土柱和框架梁节点性能的试验研究，不仅明确了节点的受力性能和传力路径，掌握了试件在静载和反复荷载作用下受力和变形特征。而且通过对试验结果的研究分析，验证了施工图设计中钢管混凝土柱和钢筋混凝土框架梁设计的可靠性，提出了为提高结构的抗震性能所应采取增加框架梁内横向配筋减少纵向配筋等措施。试验达到了预期的目的，取得了良好的效果。

本文针对钢管混凝土结构在高层建筑应用中的施工技术及经济性优势等方面进行了研究，主要进行了以下几方面的工作：

1. 对钢管混凝土的应用现状进行了总结归纳。
2. 论述了钢管混凝土结构的计算理论。
3. 配合比、火灾作用下的力学性能、徐变理论进行了初步的探讨研究。
4. 钢管混凝土节点构造、施工工艺及其工艺流程研究。

5. 列举几个较有代表性的钢管混凝土结构工程实例，着重对在工程中分别采用钢筋混凝土和钢管混凝土两种结构进行计算，并对其计算结果和经济指标进行了分析对比。

6. 综合各方面的情况，对钢管混凝土在高层建筑工程中的应用前景和发展趋势进行了研究和探讨。

通过对钢管混凝土柱的施工技术研究和工程建设实践，明确了钢管混凝土柱的受力性能，指出了在设计中应注意的事项，总结了钢管混凝土柱施工的要点，归纳了钢管混凝土柱施工的工程建设经验。为今后对钢管混凝土柱工程建设积累了经验。

本论文对于钢管混凝土在高层建筑中的应用、经济分析以及施工工艺的探讨都还只是初步的，今后还应作更进一步的深入研究，为钢管混凝土在高层建筑中的应用提供更有价值的参考依据。

现代建筑工程对建筑材料和建筑结构的要求越来越高。钢管混凝土能够适应现代工程结构向大跨、高耸、重载发展和承受恶劣条件的需要，符合现代施工技术的工业化要求，是结构工程科学的一个重要发展方向；随着建筑技术的发展，钢管混凝土结构的研究及其应用必将凭借其结构优点和经济优势而得到

更为广阔的发展。

## 5.2 钢管混凝土应用发展方向

### 5.2.1 高强度材料的应用

采用高强混凝土可以减轻结构自重、降低工程造价。随着混凝土强度的提高，其延性下降，这阻碍了它在实际工程中的应用。将高强混凝土灌入钢管中形成高强钢管混凝土，由于受到钢管的约束作用，混凝土处于三向受压状态，其延性将大为提高，而其构件的承载力也得到了相应的提高。因此，高强钢管混凝土具有很大的发展潜力。

近年来，国内外对高强钢管混凝土构件的研究表明：高强钢管混凝土的力学性能与普通钢管混凝土有所不同，其设计不能套用普通钢管混凝土构件的设计公式。而我国现行的钢管混凝土设计施工规范和规程只适用于普通钢管混凝土结构，因此必须加大高强钢管混凝土的研究力度，尽快制定出相应的设计施工规范和观察。

### 5.2.2 节点动力性能的研究

节点是结构设计中的关键部位，也是施工的难点。对于钢管混凝土节点，其合理与否直接关系到结构的安全性和整个工程的造价。钢管混凝土节点可以分为两种：钢管混凝土柱与钢筋混凝土梁的连接节点和钢管混凝土柱与钢梁的连接节点。目前，国内对于钢管混凝土节点静力性能的研究较多，而对于节点动力性能的研究报导还较少。

### 5.2.3 耐火性能的研究

我国还没有制定针对钢管混凝土结构的防火规定。对于已经建成的钢管混凝土结构，有的采用钢筋混凝土结构的要求外包混凝土，有的按照钢结构的要求涂防火材料，都没有统一规定和科学的依据。近年来，国内学者就钢管混凝土的耐火性能问题进行了研究，已经取得了可喜的成绩；应尽快编制出适合我国国情的钢管混凝土结构防火规范。

### 5.2.4 钢管混凝土结构体系抗震性能的研究

在对采用钢管混凝土柱及钢筋混凝土柱的框架结构进行了抗震性能的对比如试验研究；并从理论上分析比较了两种结构的动力性能，得出了钢管混凝土框架结构的抗震性能明显优于钢筋混凝土框架结构的结论。但目前对钢管

混凝土结构抗震性能的研究，主要还是集中在基本构件方面，而对于钢管混凝土整体结构的抗震性能的研究还不多。应开展这方面充分的研究，以提供合理的抗震设计参数，便于工程应用。

### 5.2.5 矩形钢管混凝土结构的研究

矩形钢管混凝土结构中，钢管对于其内部混凝土的约束作用相对较弱，但是它具有节点形式简单，便于施工等优点。国外学者对矩形钢管混凝土结构已进行了大量的研究，制定了相应的设计规程，在工程应用上也取得了很大的进展。我国的矩形钢管混凝土结构的设计施工规程尚在制定中。

与钢筋混凝土结构和钢结构相比，钢管混凝土结构是一种相对年轻的结构形式。随着其理论研究的深入和完善，新型施工工艺的产生和高性能材料的应用，钢管混凝土结构的应用范围将不断扩大。

### 5.2.6 钢管混凝土施工方面的研究

钢管混凝土结构在施工中也有些问题不容忽视。在结构构件的连接构造方面：①当钢管混凝土柱与混凝土梁连接时，就必须借助于柱上的牛腿和加强板。如果用暗牛腿、会给浇注混凝土带来不便，影响施工进度；②当钢管混凝土柱与无梁盖连接时，尤其是采用升板法施工时，板与柱的连接构造是相当复杂的，会直接影响到施工的进度；③为了能够充分发挥钢管混凝土的承载力，钢管混凝土的连接应尽可能地将连接力可靠地传递到核心混凝土上。常采用柱顶盖板、柱脚底板和层间隔板、穿心板等来实现。当然前提条件必须是应保证管内混凝土的密实，做到这一点也是不易的。横隔板和上、下柱的连接是比较繁琐的，尤其是对于小直径管，特别不便于施工。穿心板的制作也很麻烦，而且还会妨碍管内混凝土的浇注和振捣。一般仅在大直径钢管混凝土中使用。

### 5.2.7 预应力钢管混凝土方面的研究

实际上，随着钢管混凝土组合结构体系的应用愈来愈广泛，钢管混凝土还常用于结构的受拉部位，如钢管混凝土空间桁架的下弦及受拉腹杆、大跨度拱桥的水平拉杆和挡土墙的锚杆等。因此，提出了预应力钢管混凝土结构，即对钢管混凝土构件施加预应力，以提高结构的承载力。预应力钢管混凝土结构不仅有效地拓展了钢管混凝土的应用范围（钢管混凝土结构的应用范围不再局限于轴心受压短柱，可扩展到结构的受拉部位），而且改善了钢管混凝土

土结构的性能，也充分发挥了组合结构的优势。另外，预应力钢管混凝土结构用于斜拉桥的斜拉索亦是一种有益的尝试，可改善结构的动力性能，减小斜索垂度的影响，提高索的耐久性和抗腐蚀能力。

### 5.2.8 薄壁离心钢管混凝土结构

薄壁离心钢管混凝土结构是介于钢筋混凝土环形杆和钢管杆之间的一种新型钢—砼复合结构，该结构既可以充分发挥钢和混凝土两种材料的物理力学性能，又可避免这两种材料在各自单独实用条件下的弱点，具有良好的共同工作和力学性能。我国从 1984 年起，开始该结构研究试验，目前关于该种结构的基本计算理论、技术规程、制造工艺以及施工及验收规程均已编制出版，已形成较为完整的体系。

该种结构与传统的其它结构相比具有以下优缺点：（1）与钢筋混凝土电杆相比，其优点为：在使用钢材相同的情况下，可减小断面，减轻重量；简化制造工艺，不需要钢模，提高劳动生产率；抗震和抗冲击能力强，运输、安装破损少，搬运及立塔施工方便；可解决混凝土杆所普遍存在的裂缝问题，延长使用寿命；不需预埋件、抱箍等附件，连接方便；提高了构件及工程的美观效果。（2）与钢管结构或普通钢结构相比，其优点为：节省 25—50% 的钢材，降低造价 20—40% 左右；提高局部稳定性；解决钢管内壁防腐问题。

### 5.3 需要进一步研究的问题

综上所述，国内外学者对钢管混凝土的工作机理和力学性能研究方面已取得了一系列的重要成果，为进一步深入研究创造了条件。目前钢管混凝土构件的研究中需要进一步解决的主要关键问题有：

1) 钢管混凝土承载力计算中采用理想弹塑性模型的假设，这对抗变形能力很强的钢管混凝土是不合理的；

2) 圆钢管混凝土根据定值侧压力的实验结果得到纵向承载力与侧压力的关系从而确定其承载力，这和核心混凝土的工作状态不符；

3) 把钢管普通混凝土和钢管高强混凝土机械地分开进行研究；

4) 对钢管混凝土在动力荷载作用下的性能研究主要以实验为主，这不利于深入系统地了解动力荷载作用下的性能。

为了更安全地推广使用钢管混凝土结构，还应进行以下几个方面的研究：

1) 钢管混凝土防火设计规程的制定及防火设计方法的推广；

- 2) 钢管混凝土施工力学的研究；
- 3) 钢管混凝土中核心混凝土质量问题的控制和检测；
- 4) 钢管混凝土的徐变、疲劳及动力性能的进一步深入研究；
- 5) 钢管混凝土构件及其与梁连接节点制造及构造的标准化和工业化。

以上这些问题也是钢管混凝土结构使用和设计中的关键技术问题。钢管混凝土中由于钢管及核心混凝土两种材料在受力过程中的相互作用，使其具备了一系列优越的力学特性，也构成了其力学性能的复杂性，与钢筋混凝土结构和钢结构相比，钢管混凝土结构是一种相对较新的结构体系，因此还有必要对钢管混凝土的性能进行更深入更系统的研究。

### 参考文献:

1. 蔡绍怀. 现代钢管混凝土结构[M]. 人民交通出版社. 2003. 3.
2. 高光虎. 多高层钢结构住宅设计. 上海钢结构住宅研讨会[C]. 上海: 上海钢结构协会. 2002
3. 钟善桐. 高层钢管混凝土结构. 1999.
4. 程宝坪, 王世伟. 钢管混凝土结构的特性和研究现状[J]. 安徽 建筑, 2003. 3,
5. 臧德胜, 韦璐. 钢管混凝土支架的研究和实验室试验[J]. 建井技术, 22(6), 2001. 12
6. 臧德胜, 李安琴. 钢管砼支架的工程应用研究[J]. 岩土工程学报. 23(3). 2001. 5
7. 崔广心. 相似理论与模型试验[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社. 1990
8. 韩林海. 钢管混凝土结构[M]. 北京: 科学出版社, 2000
9. cEcs\_中国工程建设标准化协会标准, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].
10. JcJ-国家建筑材料工业局标准, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].
11. DL / T-中国电力行业标准, 钢管混凝土组合结构设计规程[S].
12. 潘友光. 混凝土强度理论及在钢管混凝土中的应用[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1989, (1): 50-51.
13. 李继读. 钢管混凝土轴压承载力的研究[J]. 工业建筑, 1985, (2)
14. 钟善桐. 钢管混凝土设计新方法[J]. 建筑工人, 1995.
15. 深圳赛格广场钢管混凝土柱——钢结构施工特点[J]·施工技术, 2000, 6.
16. 美国纽约世界贸易中心主楼倒塌原因初探 [J]2001. 12.
17. GBJ99- 98, 高层民用建筑钢结构技术规程[S].
18. 周起敬, 姜维山, 潘泰华. 钢与混凝土组合结构设计施工手册[M]1991, 1 2.
19. GB 50202—2002, 建筑地基基础工程施工质量验收规范[s]
20. 韩林海, 钟善桐. 钢管混凝土力学. 大连: 大连理工大学出版社. 1996
21. 郭晓春, 李荣春, 姜绍飞, 林立岩. 高层建筑承重结构的发展[J]. 沈阳建筑工程学院学报, 2003(1), 1-6
22. 杨华, 韩林海. 钢管混凝土拱桥动力性能研究现状[J]. 哈尔滨建筑大学学报. 2001. 133—137

23. 上海中福地产置业有限公司. 钢结构住宅的开发与应用. 上海钢结构住宅研讨会[C]. 上海: 上海钢结构协会. 2002
24. 张佩生, 钢—混凝土组合结构住宅建筑体系成套技术研究与应用. 上海钢结构住宅研讨会[C]. 上海: 上海钢结构协会. 2002.
25. 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.
26. 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, 2002, 36(2): 33—40.
27. 韩邦飞, 夏建国, 赵建明. 同种双钢管混凝土轴心受压构件的承载力研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 1995, 8(3): 75 80.
28. 俞茂宏, 混凝土强度理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
29. 赵均海. 强度理论及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
30. 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.
31. 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, 1999, 32(4): 16—26.
32. 周天华, 何宝康, 陈国津, 等. 方钢管混凝土柱与钢梁框架节点的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 9—16.
33. 余勇. 方钢管混凝土结构的性能研究[D]. 上海: 同济大学, 1998.
34. 武振宇, 张耀春. 轴向力作用下T型方管节点的塑性铰线分析[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 20—24.
35. 武胜, 武振宇. 弦杆轴力作用下K型间隙方管节点静力性能的研究[J]. 钢结构, 2003, 18(2): 38—42.
36. 武振宇, 武胜. 弦杆轴力作用下等宽K型间隙方管节点性能研究[J]. 建筑结构, 2004, 34(5): 14—17.
37. Packer J A, Henderson J E, Cao J J. 空心管结构连接设计指南[M]. 北京 科学出版社, 1997.
38. 杨强跃, 郑悦, 钢框架梁柱节点连接方式的介绍与分析, 建筑结构, 2004, 34(6), 44-48.
39. 毛炜烽, 肖岩. 抗弯框架钢梁塑性铰外移设计方法的新进展及其应用. 建筑技术开发, 2005, 32(1), 1—4.

- 40 蔡益燕. 考虑塑性铰外移的钢框架梁柱连接设计. 建筑结构, 2004, 34(4).  
3— 9.
41. 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.
42. 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): 1 815— 1 821.
43. Lee Y K , Ghosh J. The significance of J s to the prediction of shear bands[J]. International Journal of Plasticity, 1996, 12(9): 1179— 1197.
44. Satoshi Sasaki, Masaru Teraoka, Koji Morita, et al, Structural behavior of concrete-filled square tubular column with partial penetration weld corner seam to steel H beam connections[A]. Shanmugam N E , Choo Y S. Proceedings of the 4th Pacific Structural Steel Conference: Volume 2 Structural Connections [C]. Singapore: Pergamon Press, 1995. 33-40.
45. Cao J J, Packer J A, Yang G J. Yield line analysis of RHS connections with axial loads[J] Journal of constructional Steel Research, 1998 48:  
1-25
46. Wood R H. Plastic and elastic design of slabs and plates[M]. London: Thames& Hudson, 1961.
47. Lu L H. The static strength of I-beam to rectangular hollow section column connections[M], Netherlands: Delft University Press, 1997.
48. Xiao, Y., J. C. Anderson, and Wu, Y. T., Development of Bolted End Plate Connections for Steel Reinforced Concrete Composite Structures, Advances in Structures Steel, Concrete, Composite and Aluminurn, ASSCCA 2003, Sidney, Australia, June 23—25. 2003.
49. Yousef. M. Alostaz Stephen P. Schneidar, Analytical Behavior of

Connections To Concret—filled Steel Tubes, J. Construct Steel Res. , 1996, 40(2), 95— 127.

50. Atorod Aziznamini & Stephen P Schneidar, Moment Connections To Circular Concrete-Filled Steel Tube Columns, Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004(2), 213-222.

## 致 谢

值此论文完稿之际,我首先要衷心感谢我尊敬的校内导师许延生教授和张敦福教授。许延生教授为本论文的研究制定了方向,奠基了基础。在一年多的论文工作期间,从参考资料的搜集、关键问题的解决到最后论文的撰写完成,两位导师都一直关注并给予悉心指导,他们那扎实渊博的学识、严谨的治学作风和求实的科研态度令我受益匪浅,终身铭记。在此,谨向辛勤培育我的导师表示深深的谢意。

我还要感谢上海现代建筑设计院的吴学辉工程师,在本论文的撰写过程中,他们给了我很多指点和帮助,使论文得以顺利完成。

感谢各位授课老师和本论文的评阅人以及其他参加答辩工作的各位老师,并对他们致以诚挚的问候。

另外,我还要感谢我的同事戴云安、张云峰对我的支持和配合,令我在学习和工作中获益良多。

最后,我还要衷心感谢一直关心我的学业和生活,为我的成长付出了无数心血的父母和家人。

二〇〇七年四月九日

**发表论文题目：钢管混凝土结构研究的发展方向**

**刊物名称：山东建筑工程学院学报**

**刊号：ISSN1003-5990 CN37-1185TU**

**期号：鲁自刊（2006）增字 13 号 2006 年 6 月第 21 卷**

**发表时间：2006 年 6 月**

**页码：21 页到 22 页**

**字数：2768**