

钢管混凝土结构

韩林海 著

科学出版社

2000

内 容 简 介

本书通过介绍工程实例的方法,帮助读者具体地理解钢管混凝土结构体系的特点和可能的形式,针对钢管混凝土结构工程中的一些关键问题和设计要求,对圆形和方形钢管混凝土构件在静力、动力及火灾荷载作用下的荷载-变形关系系统地进行了全过程分析和完整试验验证,并在大规模参数分析的基础上提出了便于实际工程设计的简化方法。

本书可供建筑类专业的广大科技人员和高等院校相关专业的师生,以及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢管混凝土结构/韩林海著,-北京:科学出版社,2000
ISBN 7-03-008236-2

I. 钢… I. 韩… III. 钢管结构:混凝土结构
IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 76955 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2000年6月第 一 版 开本:850×1168 1/32
2000年6月第 一 次印刷 印张:12
印数:1—3 000 字数:309 000

定 价 : 24. 00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

内 容 简 介

本书通过介绍工程实例的方法,帮助读者具体地理解钢管混凝土结构体系的特点和可能的形式,针对钢管混凝土结构工程中的一些关键问题和设计要求,对圆形和方形钢管混凝土构件在静力、动力及火灾荷载作用下的荷载-变形关系系统地进行了全过程分析和完整试验验证,并在大规模参数分析的基础上提出了便于实际工程设计的简化方法。

本书可供建筑类专业的广大科技人员和高等院校相关专业的师生,以及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢管混凝土结构/韩林海著,-北京:科学出版社,2000
ISBN 7-03-008236-2

I. 钢… I. 韩… III. 钢管结构:混凝土结构
IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 76955 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2000 年 6 月 第 一 版 开本: 850 × 1168 1/32

2000 年 6 月 第 一 次 印 刷 印张: 12

印数: 1 — 3 000 字数: 309 000

定 价 : 24.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

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,因而正被越来越广泛地应用于工业厂房、高层和超高层建筑、拱桥和地下结构,并已取得良好的经济效益和建筑效果,是结构工程科学的一个重要发展方向。本书首先介绍了钢管混凝土工程的一些典型实例,旨在帮助读者具体地理解这种新型结构体系的特点和可能形式。

针对钢管混凝土结构工程中遇到的一些关键问题和实际设计工作者的要求,作者对圆形和方形截面钢管混凝土构件在静力、动力及火灾荷载作用下的荷载-变形关系进行了全过程分析和系统完整的试验验证,最后在大规模参数分析的基础上,提出了便于实际工程设计的简化方法。

在钢管混凝土中,混凝土被外围钢管所包覆,造成浇筑质量控制的难度,由于对该问题处理不当,已造成一些工程事故。本书对钢管和混凝土之间的粘结强度进行了研究,分析了其主要影响因素,并在此基础上通过对不同浇筑方式下构件的承载力及变形能力的研究,提出了混凝土质量控制及有关施工方法的建议。

以上内容均曾在国内外有关刊物及学术会议上发表,受到国内外同行和设计工作者们的关注。

本书中有关钢管混凝土静力和动力性能的成果被国家经济贸易委员会《钢-混凝土组合结构设计规程》(DL/T 5085-1999)及国家军用标准《战时军港抢修早强型钢-混凝土组合结构技术规程》(GJB)采用;有关钢管混凝土耐火性能的成果已在高度为 291.6m 的深圳赛格广场大厦钢管混凝土柱防火设计中应用。以上工程实践均取得良好的经济效益。

本书内容的研究工作还得到国家自然科学基金、霍英东教育基金和国家教育部资助优秀年轻教师基金项目的支持。

本书的研究成果均通过有关部门组织的鉴定,其中有关“钢管混凝土静力性能研究”部分曾获得 1995 年度国家教育委员会科技进步一等奖。

科学是不断发展的,人们对科学问题的认识也将不断深入。本书的一些论点仅代表作者当前对这些问题的认识。鉴于所探讨问题本身的复杂性,某些论点定会随着研究工作的深化和扩大而得到改进,这是必然的,也是应当的。因而,对本书存在的不足之处,谨请读者批评指正。

作者诚挚感谢所有为本书面世做出贡献的朋友:中国工程院院士王光远和赵国藩教授一直关注本书的出版,并提出许多建设性意见;中国工程院院士沈世钊教授在本书的撰写过程中给予了作者许多鼓励和帮助;国家电力公司电力规划设计总院的阎善章高级工程师、福建省建筑设计院的龚昌基高级工程师、福州大学的陈宝春教授、郑州铁路局和济南铁路局的乔景川和于连波高级工程师、深圳市赛格广场投资有限公司的蔡延义和陈立祖高级工程师、铁道部第一勘测设计院的孙忠飞和上海宝山钢铁公司的王怀忠高级工程师等工程界同仁为作者提供了大量的实际工程资料;博士后姜绍飞,博士生陶忠、徐蕾、冯九斌、毛小勇、贺军利,硕士生闫维波、邱明广、杨有福和杨华等均协助作者完成了大量计算或试验工作,他们均对本书作出了贡献。最后,作者特别感谢自己的导师钟善桐教授,作者在从事钢管混凝土结构的研究过程中,一直得到恩师的关注和大力支持,使作者受益匪浅。这本书其实是大家的,作者永远心存感激。

韩林海

1999 年 10 月

1 绪 言

1.1 钢管混凝土的特点

钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土而形成的构件,按截面形式不同,分为方钢管混凝土、圆钢管混凝土和多边形钢管混凝土等^[1~56],工程中常用的几种截面形式如图 1.1 所示。

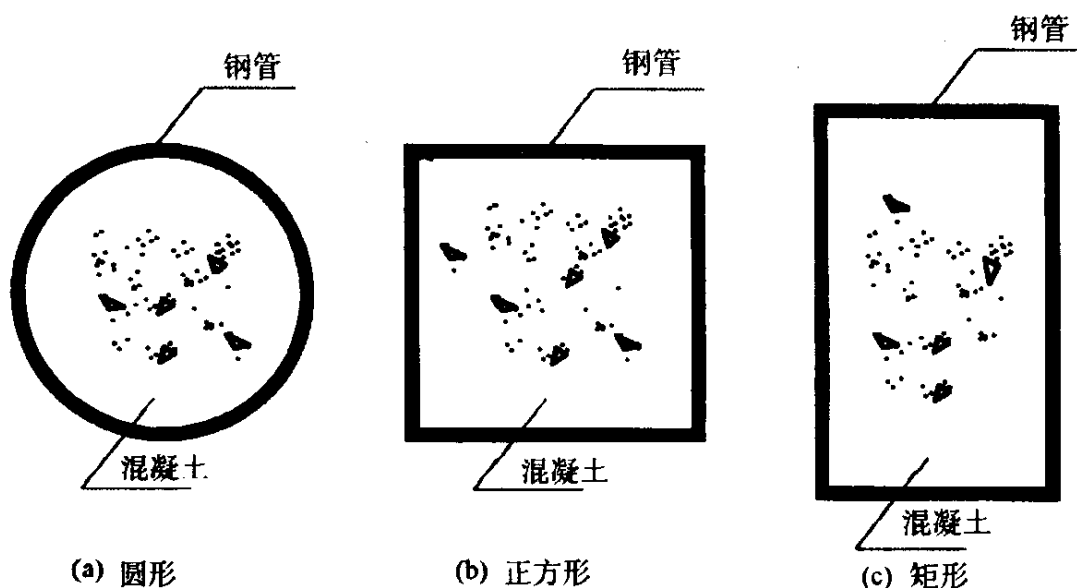


图 1.1 常见的钢管混凝土截面形式

实际结构中,根据钢管作用的差异,钢管混凝土柱又可分为两种形式:一是组成钢管混凝土的钢管和混凝土在受荷初期即共同受力,如图 1.2(a)所示;二是外加荷载仅作用在核心混凝土上,钢管只起对其核心混凝土的约束作用,即所谓的钢管约束混凝土柱,如图 1.2(b)所示。

本书主要论述实际工程中常用的圆形截面钢管混凝土(以下简称圆钢管混凝土)和正方形截面钢管混凝土(以下简称方钢管混

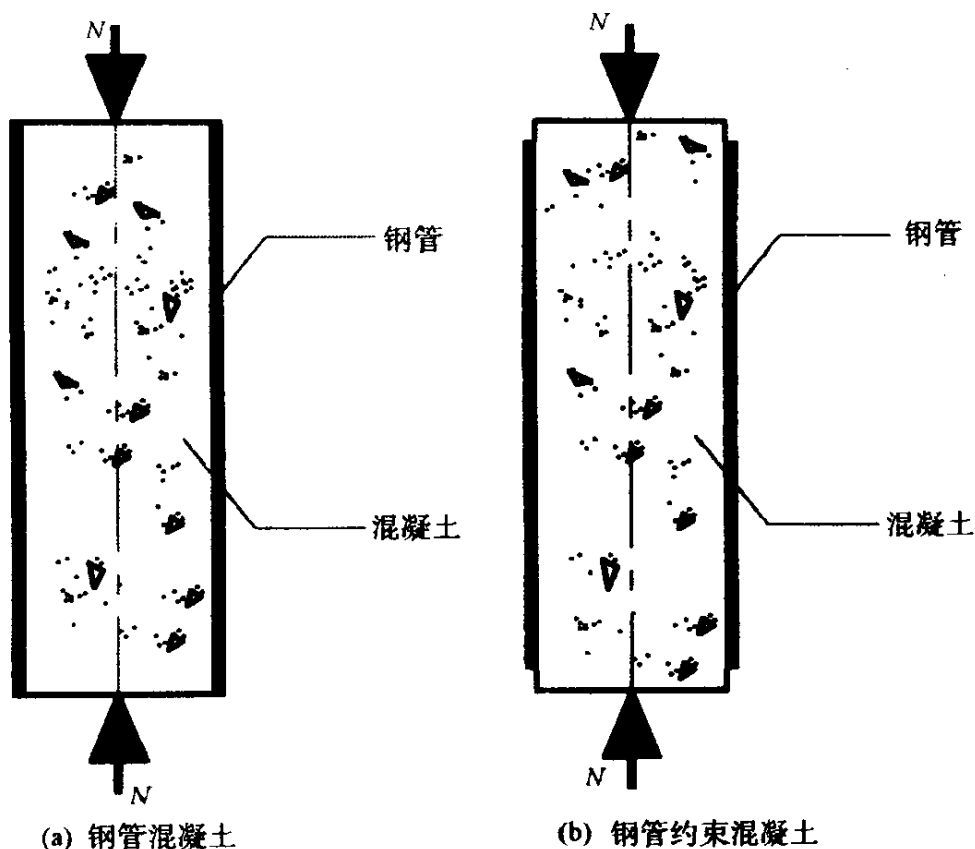


图 1.2 钢管混凝土和钢管约束混凝土

凝土)结构,且钢管和混凝土在受荷初期就共同承受外荷载的情况 [如图 1.2(a)所示]。此外,钢管混凝土构件采用的钢管应满足现行《钢结构设计规范》对保证钢管局部稳定的要求。

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,采用钢管混凝土可节省模板费用,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。

图 1.3(a)和图 1.3(b)所示分别为圆钢管混凝土轴心受压时核心混凝土及其外包钢管横截面受力图,其中, p 为径向压应力, D 和 D_c 分别为钢管及核心混凝土外直径, t 为钢管壁厚;图 1.3(c)和图 1.3(d)分别为混凝土单元和钢单元应力状态图,可见,在外荷载作用下,由于组合作用的存在,钢和混凝土两种材料均处于复杂应力状态。

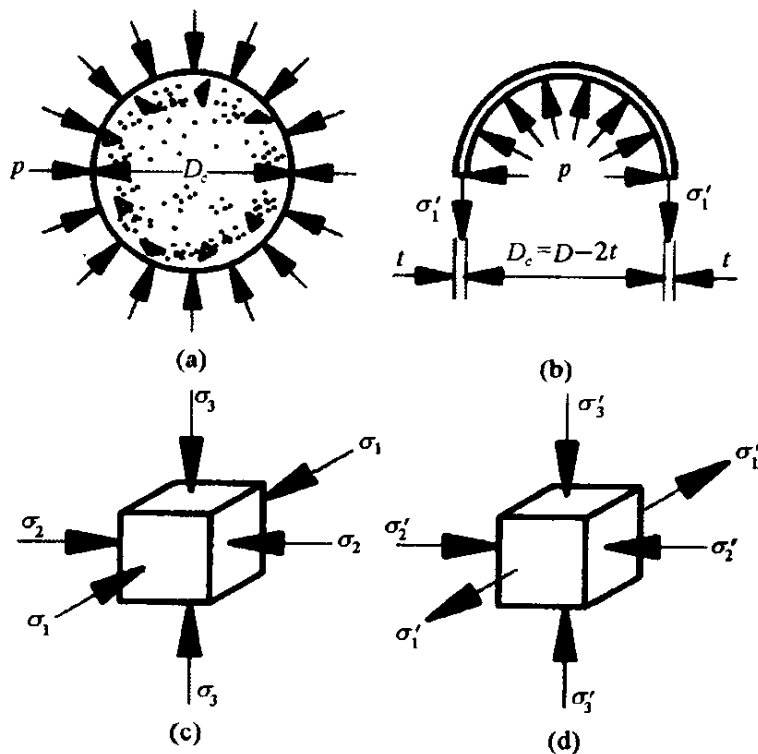


图 1.3 钢管和混凝土的受力状态示意图

钢管混凝土具有如下特点:

(1) 承载力高。

对于薄壁钢管来说,其临界承载力极不稳定,因为它对局部缺陷很敏感。实验证明,薄壁钢管的实际承载力往往只有理论计算值的 $1/3 \sim 1/5$,当有残余应力存在时,影响将更大。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[如图 1.3(c)所示],延缓了受压时的纵向开裂。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。

哈尔滨锅炉厂于 1976 年进行了一次轴心受压试件的对比试验:

1)空钢管试件:圆钢管截面直径为 400mm,壁厚为 6mm,长度为 3180mm,钢材为 Q235;

2)圆混凝土试件:截面直径为 388mm,长度为 3180mm,混凝土为 C30,构件内按《混凝土设计规范》的要求配置构造钢筋;

3)圆钢管混凝土试件:截面直径为 400mm,钢管壁厚为 6mm,构件长度为 3180mm,钢材为 Q235,内填充 C30 素混凝土。

试验获得的承载力结果如下:钢管柱为 $N_s=1392\text{kN}$,混凝土柱为 $N_c=2607\text{kN}$,钢管混凝土柱为 $N_{sc}=6938\text{kN}$;承载力结果的比较情况见图 1.4。可见钢管混凝土具有很高的承载力, $N_{sc}/(N_s+N_c)\approx 1.735$,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,产生了所谓“1+1>2”的“组合”效果。

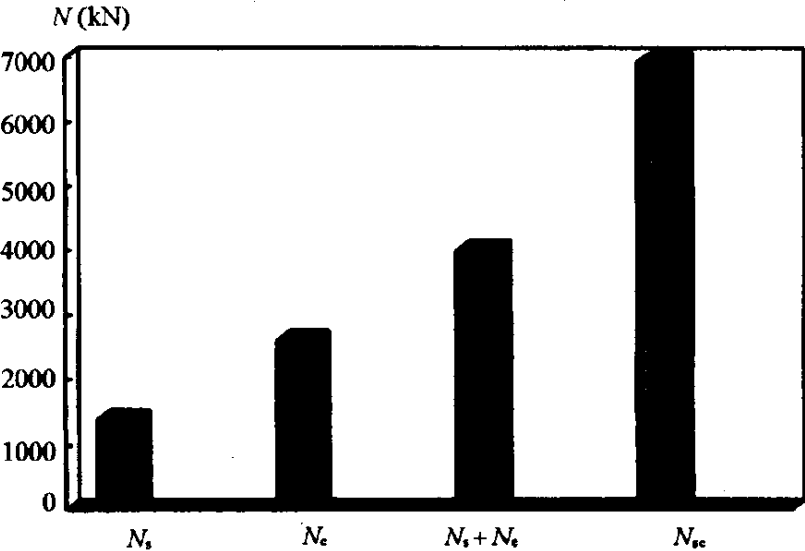


图 1.4 承载力比较

方钢管对其核心混凝土的约束作用不如圆钢管显著,但仍有很好的效果,尤其可以有效地提高构件的延性,另外,梁柱节点处

理也较容易。图 1.5 所示为一方钢管混凝土轴心受压构件试验结果与其钢管及核心混凝土单独受荷时试验结果的对比情况^[10]，可见方钢管混凝土的承载能力大大高于空钢管和混凝土单独承受外荷载的能力，构件的变形能力也很强，图中 B 和 t 分别为钢管截面外边长和钢管壁厚， L 为试件长度， f_y 和 f_{ck} 分别为钢材屈服极限和混凝土抗压强度标准值。

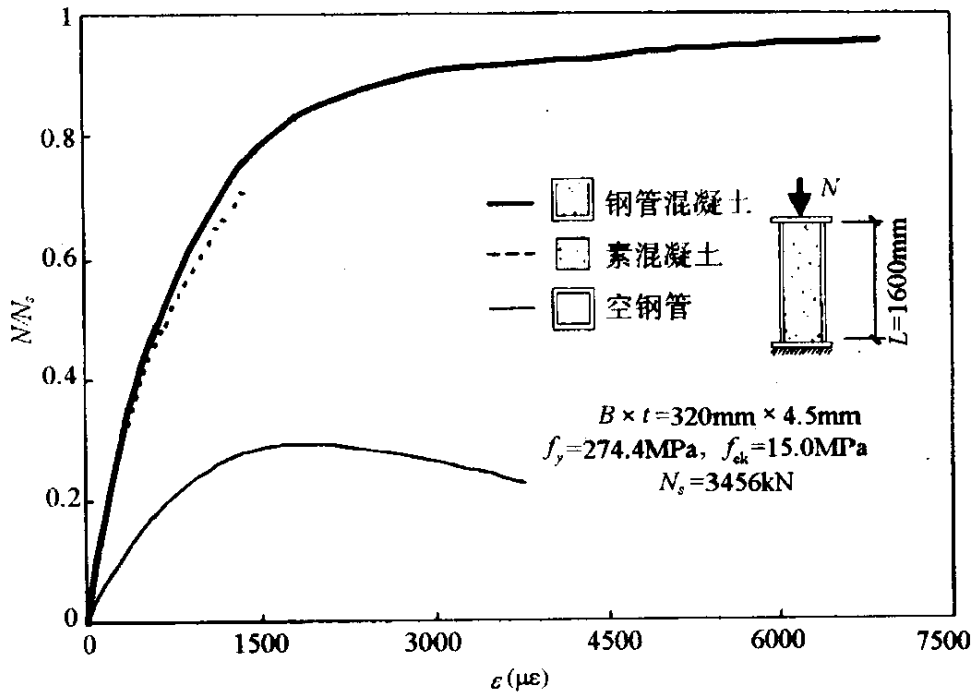


图 1.5 方钢管混凝土 N/N_s - ϵ 关系

(2) 塑性和韧性好。

混凝土脆性较大，对于高强度混凝土(各国对高强混凝土的定义有所不同，我国目前一般指立方试块强度 $f_{cu} \geq 60\text{MPa}$ 的混凝土为高强混凝土)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。试验结果表明，钢管混凝土轴心受压短柱破坏时往往可以被压缩到原长的 $2/3$ ，但仍没有呈现脆性破坏的特征。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。

由于钢管混凝土具有良好的塑性和韧性,因而抗震性能好。哈尔滨建筑大学于 1998 年进行了一系列圆钢管混凝土构件在设计轴压比等于 1 情况下滞回性能的试验研究,结果表明,钢管混凝土构件在大轴压比情况下仍然具有较好的耗能性能和延性。图 1.6 所示为一该次试验获得的滞回曲线,图中, P 为水平力, Δ 为水平位移, D 为圆钢管外直径, $\lambda=4L/D$,为构件的长细比。

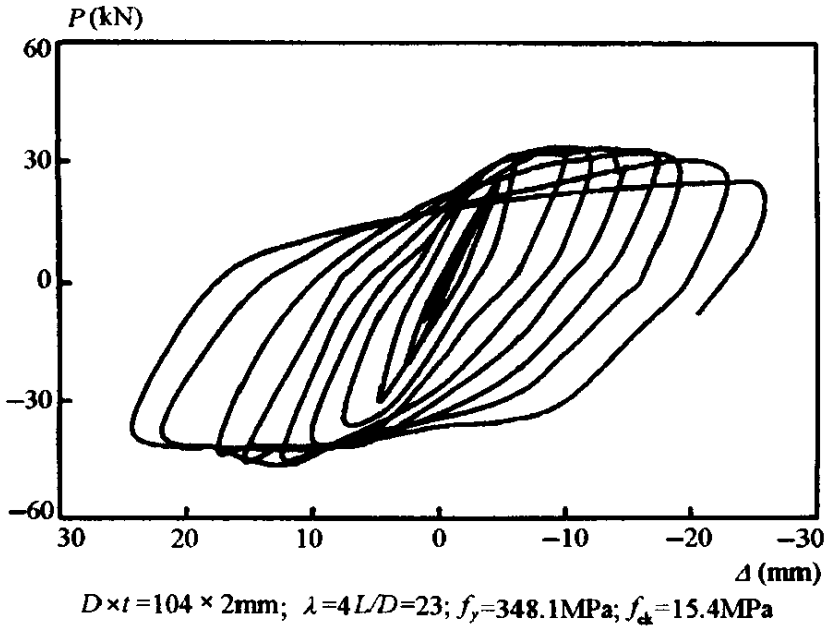


图 1.6 钢管混凝土 P - Δ 滞回曲线

(3) 施工方便。

与钢筋混凝土柱相比,采用钢管混凝土柱没有绑扎钢筋、支模和拆模等工序,施工简便,因管内无钢筋,浇灌容易,振捣密实。特别是目前采用泵送混凝土、高位抛落不振捣混凝土和免振自密实混凝土等施工工艺,更可加速钢管混凝土构件的施工进度。与预制钢筋混凝土构件相比,不需要构件预制场地;与钢结构构件相比,钢管混凝土的构造通常比钢结构构件简单,焊缝少,易于制作。特别是组成钢管混凝土构件的钢管壁厚一般均较小,现场拼接对焊简便快捷。

由于空钢管构件的自重小,可以大大减少运输和吊装等费用。此外,钢管混凝土不论是单管柱还是格构式柱,和普通钢柱相

比,柱脚零件少,焊缝短,可以直接插入混凝土基础的预留杯口中,免去了复杂的柱脚构造。

钢管混凝土在施工制造方面发展的一个重要方向是其钢管,以及与钢梁或钢筋混凝土梁连接节点制造的标准化。

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^[22,27~29]。

(4) 耐火性能较好。

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。

下面以一工程事故为例,说明钢管混凝土的这种特性。南方某玻璃厂的玻璃熔窑^[46],窑底采用了钢管混凝土柱,采用 Q235 钢、C30 混凝土,构件截面尺寸为 $D \times t = 219 \times 12\text{mm}$,柱高约 7m,柱子与基础固接。柱顶支承熔窑,柱中部支承着外圈钢走道平台,投产时,熔窑出液口突然发生崩裂,高温玻璃熔液喷泻,致使窑底正面一根柱被玻璃液包裹达 3m 深,另一根柱的根部积液深度约 40cm。出口熔液温度在 1200℃ 以上,在高压水枪的救护下约持续 3~4h,才降到 1000℃ 以下。清除了冷却的玻璃凝块后,发现钢管混凝土柱底有外凸现象发生,最大外凸尺寸约 3cm。事故发生时,柱子承受约 70% 的设计荷载,但柱子的整体性一直保持良好,避免了熔窑崩塌的重大事故。虽然建筑火灾与上述情况有所不同,但该次事故却可以很好地说明钢管混凝土柱在高温下具有良好的工作性能。

另外,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可以得到不同程度的恢复,截面的力学性能比高温下有所改善,结构的整体性比火灾中也将有所提高,这不仅为结构的加固补强提供了一个较安全的工作环境,也可减少补强工作量,降低维修费用。这和火灾后的钢筋混凝土结构与钢结构都有所不同:对于钢筋混凝土结构,其已改性破坏截面的力学性能和整体性,均不能因温度的降低而有所恢复或改善;对钢结构,其已失稳和扭曲的构件在常温下也不会带来更多的安全性。上述玻璃熔

液喷泻事故发生后,由于钢管混凝土柱仍然具有很好的整体性,在进行修复时,对受损柱子在外面加一套管,再将空隙处灌入混凝土,仅两天时间就加固完毕,施工极为简便,该玻璃厂很快恢复生产。

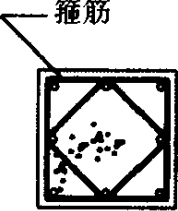


(5) 经济效果好。

如前所述,作为一种较为合理的结构形式,采用钢管混凝土可以很好地发挥钢材和混凝土两种材料的特性和潜力,使材料得到更为充分和合理的应用,因此,钢管混凝土具有良好的经济效果。

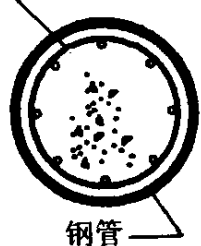
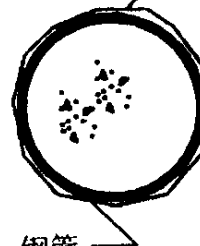
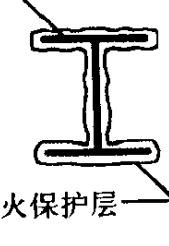
大量工程实际表明:采用钢管混凝土的承压构件比普通钢筋混凝土承压构件约可节约混凝土 50%,减轻结构自重 50%左右,钢材用量略高或约略相等;和钢结构相比,可节约钢材 50%左右。

澳大利亚学者 Webb 等通过计算分析^[29],给出了(多)高层建筑中不同类型柱子相对于钢筋混凝土柱造价的比较情况,见表 1.1。由表可见,在各种方案中,采用钢管中填充素混凝土的钢管混凝土的造价与钢筋混凝土相比基本持平,经济效果良好,随着建筑层数的增加,钢管混凝土的经济效果越发明显。

表 1.1 柱结构经济效果比较

结构类型 建筑层数	钢筋混凝土 	钢筋混凝土 (内配型钢) 	劲性混凝土 
10	1.0	1.22	1.53
30	1.0	1.13	1.85

续表

结构类型	钢管配筋混凝土	钢管混凝土	钢结构
			
建筑层数			
10	1.16	1.10	2.27
30	1.11	1.02	2.61

1.2 钢管混凝土的发展和研究

钢管混凝土是在劲性钢筋混凝土及螺旋配筋混凝土的基础上演变和发展起来的。最早采用钢管混凝土的工程之一是1879年英国的 Severn 铁路桥桥墩,在钢管内填充混凝土以防止锈蚀并承受压力,随后,钢管混凝土又被用做单层或多层工业厂房的结构柱。但在早期的应用中一般不考虑由于组成钢管混凝土的钢管及其核心混凝土间相互作用对承载力的提高。对钢管混凝土力学性能进行较为深入的研究,及这类结构被大范围推广应用主要是在60年代以后。早期钢管混凝土采用的钢管往往是热轧管,钢管的壁厚一般均较大^[1~9],而且由于钢管内混凝土浇筑工艺未得到很好解决,因而经济效果不明显,从而使钢管混凝土的推广应用受到一定影响。

前苏联在五六十年来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。在西欧一些国家如英国,德国和法国等,主要研究方钢管混凝土、圆钢管混凝土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。目前的设计规程主要有 EC4(1996)、德国

的 DIN18800(1997)等;美国以研究方钢管混凝土和圆钢管混凝土为主,核心混凝土为素混凝土,设计规程主要有 ACI319-89、SSLC(1979)和 LRFD(1994);日本 1923 年关西大地震后,发现钢管混凝土结构在该次地震中的破坏并不明显,故在以后的建筑尤其是(多)高层建筑中,钢管混凝土得到大量应用,特别是 1995 年阪神地震后,钢管混凝土更显示了优越的抗震性能,钢管混凝土的研究进一步成为热门课题之一。日本主要研究方钢管混凝土、圆钢管混凝土和矩形钢管混凝土结构,核心混凝土为素混凝土或配筋混凝土,目前的设计规程主要有 AIJ(1980,1997)。澳大利亚和加拿大等国学者尚对薄壁钢管混凝土结构进行了系统深入的研究,目前正在编制自己的设计规程。

我国主要集中研究在钢管中浇灌素混凝土的内填型钢管混凝土结构,在这方面最早开展工作的是原中国科学院哈尔滨土建研究所。到 1968 年以后,原建筑材料研究院(现苏州混凝土与水泥制品研究院)、北京地下铁道工程局、原哈尔滨建筑工程学院(现哈尔滨建筑大学)、冶金部冶金建筑科学研究所、电力工业部电力研究所及中国建筑科学院等单位都先后对基本构件的工作性能、设计方法、节点构造和施工技术等开展了比较系统的研究。60 年代中,它开始在一些厂房柱和地铁工程中采用。进入 70 年代后,这类结构在冶金、造船、电力等行业的单层或多层工业厂房中得到进一步推广应用。1978 年,钢管混凝土结构第一次被列入国家科学发展规划,从此,这一结构在我国的发展进入一个新阶段,无论是科学研究,还是设计施工,都有了较大的进展,实际工程应用也迅速增加,取得了良好的经济效益和社会效益。进入 80 年代后,我国在这一领域的研究工作进一步深入,工程应用进一步推广。我国关于钢管混凝土结构的研究正日趋深入,特别是近十几年来取得了令人瞩目的成就^[47~63,65~76],目前已先后由国家建材总局、建设部、国家经贸委和中国人民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,主要有 JCJ01-89:(1989)、CECS28:90(1992)、DL/T5085-1999(1999)和 GJB(1999)^[53~56]。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结构创造了条件。

对于钢管混凝土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。研究者们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约束效应理解不同,因而估计的准确程度也会有所不同,所获计算方法和计算结果也就会有出入。但无论采用那种办法,其目的都是为了寻找钢管混凝土合理的设计方法。

下面对目前钢管混凝土的研究方法进行简要论述。

1.2.1 钢管混凝土的静力性能

(1) 轴压构件。

对钢管混凝土轴心受压短试件强度承载力的计算方法可归纳为两类:一类是确定极限承载力;另一类是确定进入塑性工作阶段的承载力。

由于混凝土工作性能的非线性,以及两种材料共同工作时性能的复杂性,求其极限荷载是比较简捷的方法。也可认为这类方法是螺旋箍筋钢筋混凝土柱计算原理及方法的移植和发展。基本概念是:钢管对核心混凝土提供了约束,使混凝土三向受压,从而提高了承载力,达到极限承载力时,钢管纵向应力为零,环向应力达屈服点,因而约束效应最大。然而,不少研究者通过试验观察到试件在达到极限状态时,钢管纵向应力并未降为零,环向应力也未达到单向受拉时的屈服点^[47]。

近年来,国内外很多研究者放弃了求极限荷载的方法,转而采用以钢管发展塑性,混凝土达极限为钢管混凝土轴心受压时的极限状态。达此极限状态时,假定钢管屈服而核心混凝土达极限强度。研究方法又可分两种类型,一种是不考虑钢管的约束效应,另一种是考虑钢管的约束效应。当然,以后者较为合理。该方法的关

键是如何确定进入塑性阶段时钢管的纵向应力。不同的研究工作者采用不同的强度理论,有的采用塑性理论,有的采用八面体理论,有的假设钢管和核心混凝土均为理想弹性塑性体,采用最大剪应力理论,或用莫尔强度理论^[47],所得结果大体相同;而按理想弹塑性体分析时,结果稍偏低。根据试件转入塑性阶段为承载力极限的方法,一般均未提出极限状态准则,而且钢管出现塑性和核心混凝土达强度极限也不一定同步。有个别研究工作者采取了限制纵向变形的方法来确定轴压承载力,如对于圆钢管混凝土,美国建筑法规 ACI319-89 定义混凝土纵向应变为 $3000\mu\epsilon$ 时相应的承载力为强度承载力。也有学者提出以残余应变为 $2000\mu\epsilon$ 时相应的承载力为强度承载力。对于并无明显屈服阶段的构件,以变形达某一值为极限状态是合理可行的,但是以残余应变值为标准不便于使用。

对钢管混凝土轴心受压时临界力的计算方法可归纳为如下几种:

1)应用欧拉公式确定承载力^[3]。

认为构件的临界力是钢管和混凝土的欧拉临界力之和,表达式为

$$N_{cr} = \frac{\pi^2(E_s I_s + E_c I_c)}{L^2} \quad (1.1)$$

式中 E_s 、 E_c 分别按规定采用弹性模量,只适用于弹性阶段稳定承载力的计算。也有学者推荐了如下计算公式^[49]:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E'_{sc}}{\lambda^2} \quad (1.2)$$

式中, E'_{sc} 称为钢管混凝土的综合弹性模量,应该是钢管混凝土的抗弯模量,文献[49]借用混凝土单轴受压时的应力-应变关系,据此导得的结果不完全符合实际,又根据实验结果进行了修正。

2) 根据实验结果回归计算公式^[48]。

采用对实验数据回归分析的办法推导钢管混凝土构件承载力计算公式,其优点是直观和简单,也是一种解决复杂问题比较简易的方法,但往往由于实验数据有限,外延性相对较差,因而不得不