



钢管混凝土

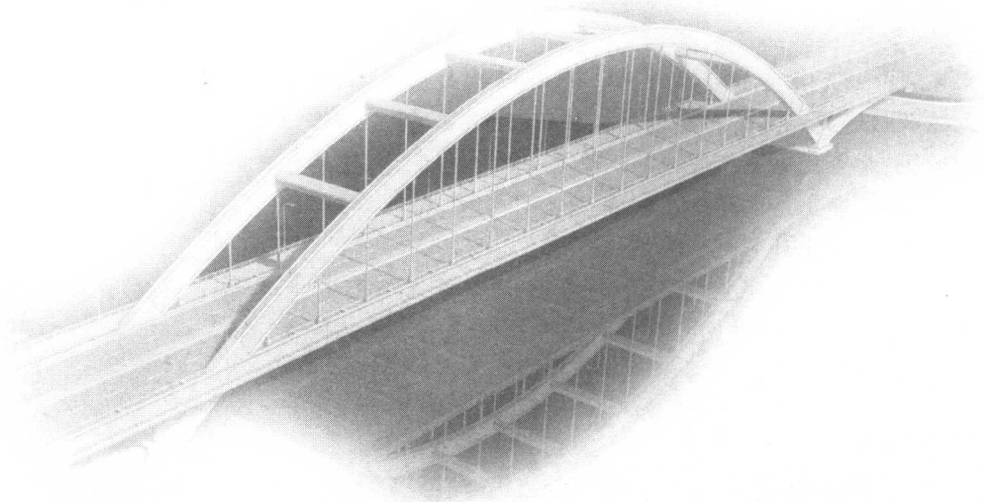
Steel Tube Confined Concrete

胡曙光 丁庆军 著



人民交通出版社

China Communications Press



钢管混凝土

Steel Tube Confined Concrete

胡曙光 丁庆军 著



人民交通出版社

China Communications Press

内 容 提 要

本书系统介绍了钢管混凝土材料的组成、结构与性能的关系,阐明了混凝土强度性能、膨胀性能与工作性能的相互关系与作用机理;针对钢管混凝土的性能特点,从钢管混凝土的材料复合原理入手,重点论述了钢管内核心混凝土的体积变形、膨胀性能设计、材料制备及其控制方法;结合钢管混凝土结构的工程实际,介绍了钢管混凝土的配合比设计方法、施工技术、质量检测,以及钢管混凝土计算机专家系统。

本书内容丰富、体系完整,具有很强的实用性,可供结构工程、交通工程、混凝土及其制品等部门的科研、设计、生产技术人员和大中专院校师生使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢管混凝土 / 胡曙光, 丁庆军著. —北京: 人民交通出版社, 2007.1

ISBN 978-7-114-06359-6

I. 钢... II. ①胡... ②丁... III. 钢管结构: 混凝土结构 IV. TU37

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第158107号

书 名: 钢管混凝土

著 者: 胡曙光 丁庆军

责任编辑: 韩亚楠 高 培

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 19.5

字 数: 491千

版 次: 2007年1月 第1版

印 次: 2007年1月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-06359-6

印 数: 0001 — 3000册

定 价: 38.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



作者简介

胡曙光，男，1957年出生，湖北武汉人。博士研究生学历，工学博士，教授，博士研究生导师，武汉理工大学首席教授，水泥与混凝土学科带头人。享受国务院政府特殊津贴，国家新世纪百千万人才工程（第一层次）人选，湖北省有突出贡献中青年专家。在国家建材行业科学技术教育委员会、硅酸盐材料工程教育部重点实验室学术委员会和多家学术团体任职，担任《建筑材料学报》、《武汉理工大学学报》、《华中科技大学学报》等多家学术刊物副主编和编委。

胡曙光已承担国家自然科学基金、国家高科技发展研究计划（863计划）、国家重点基础研究规划（973计划）、国家攻关和各类省部级科研20多项，参加各种混凝土工程技术攻关与应用项目30余项，取得良好的社会效益和经济效益。先后获得省部级鉴定和验收成果近30项、国家科技进步二等奖2项和省部级10多项，申请国家发明专利40余项，已授权9项。公开发表学术论文260余篇，被SCI、EI收录80多篇，主编、参编著作7部。培养博士后、博士、硕士研究生80余名。

主要研究领域和方向：先进水泥基复合材料设计理论与制备原理、高性能混凝土性能设计与制备技术、高性能水泥材料在交通工程（公路、铁路、桥梁、隧道）中的应用、环境与生态建筑材料制备原理与应用技术、特种水泥与混凝土制品研究与新产品开发、计算机信息技术在水泥混凝土领域中的应用。

序 言

钢管混凝土拱桥是我国自主创新的新型桥梁结构,因其造型优美、架设方便、造价低廉、适应性广泛,特别适用于山林重丘区的桥梁工程建设,对于跨度 200m 以上的桥梁具有明显技术经济优势。在大跨度桥梁家族中,占有一席之地。

钢管混凝土拱桥的主要部件是钢管混凝土,钢管混凝土拱桥对混凝土的技术要求很高,混凝土按设计要求应该具有高强、膨胀稳定和有良好的可施工性能。钢管混凝土是一种复合材料,其技术核心是混凝土与钢管有效复合,钢管内混凝土应保持一定的膨胀应力,以实现复合材料的“套箍”复合效应,这样才能发挥其技术优势。

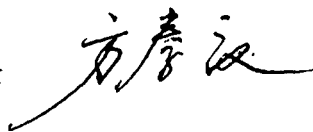
过去在钢管混凝土的混凝土性能设计和施工方面缺乏系统科学的理论指导。突出的表现是混凝土膨胀材料的选择缺乏指导依据,混凝土的长期膨胀性能不稳定,膨胀量无法控制。另一方面,从技术特点上讲,大跨度拱桥的混凝土需要用高强混凝土和泵送施工,因为混凝土输送距离远、高度高、时间长,且要求连续施工并一次完成,而掺加了膨胀剂的混凝土和易性明显下降,高强混凝土配水量低,非常难施工,质量无法得到保证。这些问题造成实际工程中混凝土与钢管间的脱空状况比较普遍和突出,致使复合设计性能失效甚至产生结构稳定隐患。

胡曙光教授等人通过“新型高强微膨胀低热大管径钢管混凝土的研究应用”、“大跨度拱桥结构钢管高强膨胀混凝土制备技术”等课题研究,取得了一系列的国家技术发明专利和大量科技论文的成果,形成了钢管混凝土较为完整的理论和技术体系。采用这些成果指导混凝土的膨胀性能设计与施工、有效地解决了混凝土性能的膨胀和稳定等技术控制难题,大大推进该技术的应用和发展。正是由于该技术的突破和应用,近几年内已有 20 多座跨度超过 200m 的大跨度钢管混凝土拱桥相继建成,其中巫山长江大桥的跨度已达到 460m,该技术成果在国内外产生很大的影响,说明我国的钢管混凝土拱桥设计和建造水平达到了世界先进水平,为我国桥梁工程建设做出了重要贡献。

《钢管混凝土》一书是作者们在此方面十几年来系统科学研究成果和在大跨度钢管混凝土拱桥工程应用中所积累的宝贵经验总结,具有较高的学术价值和实用价值,对钢管混凝土的研究特别是大跨度钢管混凝土拱桥的工程应用将会起到积极的推动作用。

在此书出版之际,我愿为作序,并表示祝贺。

中国工程院院士



2006 年 10 月

前 言

钢管混凝土组合是一种有效的材料复合技术方法,理论上可提高混凝土材料的性能。利用钢材强度高和韧性好的特点与混凝土进行复合,组成钢混结构组合材料,可同时发挥两者的优势,扩大应用范围。钢管混凝土是将素混凝土灌入钢管而制成,是钢混结构组合材料中最重要的一种形式。其复合设计原理是:混凝土受到钢管壁的紧箍作用,强度、韧性和耐久性可大大提高;钢管中填充了混凝土,可提高结构的稳定性并减少用钢量;组合材料的综合性价比明显优于两种材料自身。

钢管混凝土组合材料的关键技术必须使核心混凝土与钢管壁紧密结合,获得复合效果,这样才能实现所设计的复合性能。普通混凝土硬化后存在一定程度的体积固有收缩,因此核心混凝土必须设计为具有体积膨胀和可控制的性能。但已有各种膨胀混凝土目前难以满足此要求,主要是膨胀量难以准确控制,混凝土的膨胀不均匀,易造成混凝土与钢管壁脱粘形成空腔,钢管混凝土的复合设计性能无法发挥。要实现其突破必须解决以下关键技术:膨胀与收缩和强度发展的协同性,密闭状态下混凝土持续稳定膨胀、混凝土—钢管壁膨胀应力设计与可控性,膨胀混凝土的制备及其施工技术与工艺。

国内外对钢管混凝土的研究过去主要集中在结构方面,这方面的研究成果和论文专著已有不少,而对钢管内核心混凝土的研究却很少,缺乏对混凝土膨胀性能及其强度发展规律的系统性认识,更未达到定量设计和可控的水平。因此在钢管混凝土的混凝土性能设计和施工方面缺乏系统科学的理论指导,过去设计和施工单位一般采用常用的混凝土膨胀技术,在实际工程中用各种不同混凝土膨胀材料来试验和摸索混凝土配合比,这样往往既浪费材料,又保证不了混凝土和工程的质量。表现突出的问题是选择混凝土膨胀材料的困难,混凝土的长期膨胀性能不稳定,膨胀量无法控制。

针对以上问题,首先,必须研究和解决混凝土膨胀性能的设计与控制问题,在系统研究混凝土体积变化规律、膨胀机理和特性的基础上,设计和开发出可满足钢管混凝土体积变形设计要求的膨胀组分;其次,要研究并掌握在钢管封闭状态下保持混凝土可持续膨胀的技术方法,实现对混凝土膨胀和应力的有效控制;同时,还应研究并掌握大跨度钢管高强膨胀混凝土的制备技术和施工工艺,并进行技术成果的系统集成和推广应用。

本书从材料学原理出发,系统研究了钢管混凝土材料的组成、结构与性能的关系,阐明了混凝土强度性能、膨胀性能与工作性能的相互关系和作用机理;针对钢管混凝土的性能设计特点,深入研究了钢管内核心混凝土的体积变形行为、膨胀性能设计方法。在理论成果指导下,开展原材料选择与预处理,混凝土配合比、强度、膨胀与工作性能设计,混凝土材料制备与过程控制,混凝土性能试验与质量检测。同时,也结合总结近年来参加 20 余座大跨度钢管混凝土拱桥的施工经验,介绍各类拱桥结构的特点、工程准备步骤、混凝土施工、过程监控、质量保障等方面的情况。最后介绍了所研制开发的钢管混凝土计算机专家系统。

本书作者及其团队所承担的“新型高强微膨胀低热大管径钢管混凝土的研究应用”、“大跨

度拱桥结构钢管高强膨胀混凝土制备技术”等国家自然科学基金、省部级科技攻关课题,以及所申报的国家技术发明专利和发表的大量科技论文,形成了钢管混凝土较为完整的和具有自主性知识产权的理论与技术体系。这些成果包括申请和获得国家发明专利 9 项,获国家计算机软件著作权 1 件,公开发表学术论文 70 余篇,被 SCI、EI 收录 30 余篇次。本著作的相关理论研究和科技成果已获部级技术发明一等奖和省级科技进步一等奖各一项。

全书共十三章,主要研究和撰写工作由胡曙光、丁庆军负责完成,何永佳参加了第一、二、三、十三章的部分撰写工作,李悦参加了第四、五、七、八、九章的部分研究和撰写工作,吕林女参加了第六、七、十四章的部分研究和撰写工作,参加撰写的还有杨文、吴静、陆红兵。胡曙光负责统稿。

由于本书作者水平有限,书中的错误和疏漏在所难免,尚祈广大读者不吝赐教。

胡曙光 丁庆军

2006 年 10 月

目 录

第一章 钢管混凝土简介	1
第一节 钢管混凝土结构	1
第二节 钢管混凝土材料	3
第三节 钢管混凝土的发展	7
第四节 本书特点与背景资料	12
第二章 钢管混凝土原材料	13
第一节 水泥	13
第二节 矿物掺合料	24
第三节 混凝土外加剂	30
第四节 石膏	35
第五节 混凝土集料	37
第六节 混凝土拌和用水	43
第三章 混凝土膨胀材料	46
第一节 膨胀剂及膨胀混凝土发展史	46
第二节 膨胀水泥和膨胀剂的分类	47
第三节 膨胀剂的应用	53
第四章 钢管混凝土的水化硬化机理与微观结构	57
第一节 普通混凝土的水化硬化机理与微观结构	57
第二节 膨胀混凝土的水化硬化机理与微观结构	63
第五章 钢管混凝土的收缩变形	84
第一节 概述	84
第二节 化学收缩	85
第三节 自收缩	86
第四节 温度收缩	94
第五节 塑性收缩	96
第六节 徐变	99
第七节 其他收缩类型	101
第八节 核心混凝土的收缩模式	102
第六章 钢管混凝土膨胀性能的设计与控制	104
第一节 钢管混凝土膨胀性能设计	104
第二节 胶凝材料组成的匹配设计	107
第三节 高能复合膨胀材料的设计与制备	111
第四节 钢管混凝土体系的自供水机制与释水因子技术	118

第五节	钢管混凝土膨胀性能的精确控制	122
第七章	钢管混凝土工作性能与强度性能的优化设计	125
第一节	工作性能的优化设计	125
第二节	强度性能的优化设计	136
第八章	钢管高强膨胀混凝土的配合比设计	140
第一节	基本原理	140
第二节	普通粉煤灰混凝土配制实例	141
第三节	粉煤灰膨胀混凝土配制实例	144
第四节	矿渣高强膨胀混凝土配制实例	147
第五节	高强免振捣膨胀混凝土	149
第九章	钢管膨胀混凝土构件试验与分析	153
第一节	试验准备方法	153
第二节	钢管膨胀混凝土力学性能	156
第十章	硫铝酸盐水泥早强钢管混凝土	161
第一节	硫铝酸盐水泥混凝土工作性能优化	161
第二节	硫铝酸盐钢管混凝土的优化设计与制备	169
第三节	早强膨胀钢管混凝土的力学性能	175
第十一章	特种钢管混凝土	181
第一节	轻集料钢管混凝土	181
第二节	预应力钢管混凝土	189
第三节	超高强钢管混凝土	194
第四节	耐火钢管混凝土	197
第五节	聚合物钢管混凝土	201
第十二章	钢管混凝土的施工	205
第一节	混凝土浇筑方法	205
第二节	施工准备	208
第三节	钢管混凝土拱桥的混凝土施工	210
第四节	钢管混凝土的脱粘处理	215
第十三章	混凝土质量检验与控制	218
第一节	质量保证和管理体系	218
第二节	新拌混凝土质量检测与控制	219
第三节	混凝土的体积变形性能检测与控制	223
第四节	硬化混凝土质量检测	230
第五节	钢管混凝土的灌注质量检测	237
第十四章	钢管混凝土专家系统的研制	254
第一节	概述	254
第二节	钢管混凝土专家系统框架设计和功能	255
第十五章	钢管混凝土工程应用实例	266
第一节	湖北武汉晴川桥	266
第二节	重庆巫峡长江大桥	269

第三节	广东东莞水道大桥	273
第四节	广西南宁永和大桥	275
第五节	浙江淳安千岛湖南浦大桥	278
第六节	湖北秭归龙潭河大桥	280
第七节	湖南益阳茅草街大桥	282
第八节	湖北武汉长丰桥	285
第九节	广东潮州韩江北桥	286
第十节	浙江临安华光潭大桥	289
第十一节	湖北秭归青干河大桥	291
参考文献		293

第一章 钢管混凝土简介

第一节 钢管混凝土结构

一、钢管混凝土的分类

钢管混凝土是将混凝土填充入钢管内形成的材料。钢管混凝土从材料学设计原理上来讲是一种复合材料,它是由金属钢与无机非金属的混凝土所复合而成的,是钢—混凝土组合结构中最重要的一种形式。其复合设计原理是:混凝土受到钢管壁的紧箍作用,强度和韧性可大大提高;钢管中填充了混凝土,可提高结构的稳定性并减少用钢量;组合材料的综合性价比明显优于以上两种材料自身。

按照钢管混凝土截面形状的不同可分为圆钢管混凝土(图 1-1a)、方钢管混凝土(图 1-1b)、

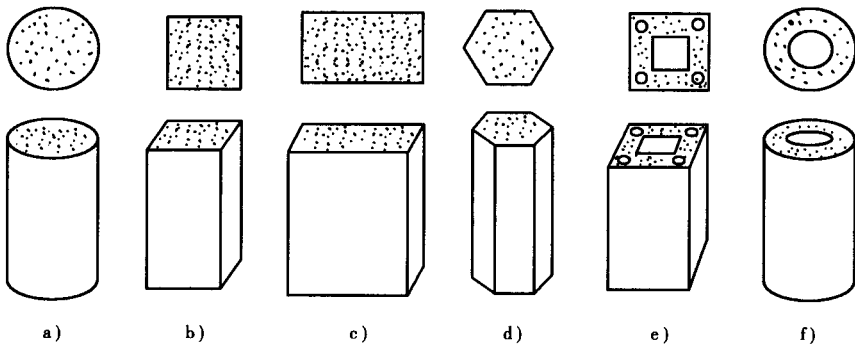


图 1-1 不同截面形状的钢管混凝土示意图

矩形钢管混凝土(图 1-1c),还有比较少见的多边形钢管混凝土(图 1-1d)。其中研究和应用最为广泛的是圆钢管,由于其平面形状呈轴对称,承受压力荷载时钢管环向应力均匀,同时核心混凝土受到紧箍力也均匀,因而受力性能最好,并且圆形钢管还具有加工成型方便的优点,因此在实际工程中应用最为广泛。根据钢管与混凝土的组合关系,钢管混凝土除了以上内填型外还有内填外包型(图 1-1e)和空心圆管型(图 1-1f)。同时内填型根据核心混凝土内部是否配筋还可分为配筋内填型钢管混凝土(图 1-2)和不配筋内填型钢管混凝土。

根据钢管内核心混凝土的性质不同又可分为普通混凝土、普通膨胀混凝土、补偿收缩混凝土、膨胀自应力混凝土、高强膨胀混凝土。根据混凝土的材料组成不同还可分为素混凝土、粒子或纤维增强混凝土、轻集料混凝土。

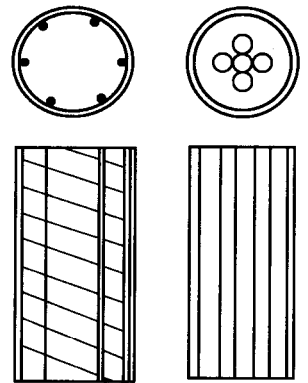


图 1-2 配筋内填型钢管混凝土

二、钢管混凝土的特点

混凝土具有原材料来源广泛、生产与制备方便、耐久性好、成本低等优点,是当今使用最广泛、最重要的结构工程及基础建筑材料。但混凝土存在着韧性差和抗弯强度较低等缺陷,这使其应用范围受到了限制。钢材具有强度高和韧性好的突出优点,长期以来一直是结构工程的最主要材料。但钢材存在着自重大、耐腐蚀性差和成本高等不足。利用钢材强度高和韧性好等特点与混凝土进行复合组成钢混组合结构材料,不仅可以发挥两者的优势,并可产生一些优异的复合作用效果。近年来,钢管混凝土在大型基础、高层建筑和大跨度结构工程中得到了迅速的推广应用,并且这一趋势方兴未艾,其中主要的原因就是钢管混凝土所具有的优点得到了发挥。其特点如下:

1. 承载能力高

钢管混凝土组合材料在复合作用下形成“紧箍作用”后,钢管约束了混凝土,改变了混凝土的受力状况,在轴心受压荷载作用下,将单向受压改变为三向受压(图 1-3),可延缓其受压时的纵向开裂,提高了混凝土的抗压强度。同时,由于混凝土的填入,可以延缓或避免薄壁钢管过早地发生局部屈曲,保证了钢管的局部稳定性。由于两者的协同承载作用,钢管混凝土组合结构的轴向承载能力可以超出钢管和混凝土单独承载能力之和,而且还可使结构的抗变形能力显著提升。两种材料的复合效应弥补了各自的不足,充分发挥了两者的长处。

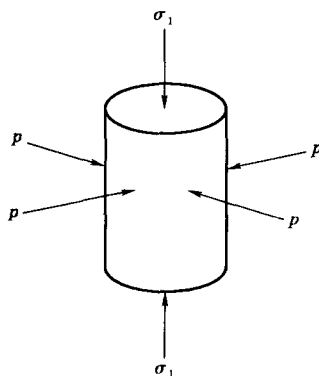


图 1-3 钢管核心混凝土所受的三向应力状态

2. 塑性和韧性好

混凝土的脆性是其致命弱点,属于脆性破坏材料,对于高强混凝土情况更为严重。在钢管混凝土中,核心混凝土由于受到钢管的约束,混凝土处于三向受力状态,这可以有效改变其在使用过程中的弹性性质,也使破坏时产生较大的塑性变形。钢管的套箍作用大大提高了混凝土的塑性和韧性,克服了混凝土单独受压时脆性大的弱点。试验证明,钢管混凝土受压构件属于塑性破坏。

3. 耐火和抗震性能好

钢结构的耐火性能较差是这类结构安全性的致命隐患。在火灾等高温环境下,钢结构由于软化而使其承载能力急剧降低,而钢管混凝土结构在经受高温冲击时,核心混凝土可以吸收钢管壁传来的热量,使其升温软化过程滞后。即使在钢管壁发生一定程度的软化时,核心混凝土仍然可以保持较高的承载能力,使结构不至于突然破坏或坍塌。通常,在火灾和高温环境下,或在急剧降温情况下,裸露的混凝土会发生崩裂现象,但在钢管混凝土中的核心混凝土,由于钢管的保护作用而不会出现这种状况。同时,钢管混凝土结构在火灾时及火灾后的抗撞击性能通常也优于钢结构和钢筋混凝土结构。正是由于钢管与混凝土的这种互补协同作用,使钢管混凝土具有总体较好的耐火性。

钢管混凝土结构与其他结构相比,具有自重轻的特点,混凝土的塑性和韧性得到很大改善,钢管的存在有效增加了结构的延性,因此提高了构件和结构的抗震性能。

4. 耐久性能得到改善

混凝土耐久性问题的实质,是外界介质的侵入与混凝土内部组成物质的化学反应破坏了

原有的结构,使材料性能下降。而在钢管的封闭状态下,核心混凝土与外界侵蚀介质相隔绝,因而避免了发生不利化学反应的情况,其耐久性得到根本改善。另一方面,由于填充了核心混凝土,钢管内壁与碱性混凝土紧密相接,无需再采取其他防腐措施,只需对钢管外壁进行防腐处理。如果采用是的内填外包型钢管混凝土结构,连外壁也不需要处理了。钢管混凝土具有很好的耐腐蚀、耐久性能。

5. 有利于采用高强混凝土技术

混凝土作为结构材料的不足是强度与质量比(比强度)较低。高强混凝土是近些年所发展起来的先进混凝土技术,混凝土的强度高,这赋予了传统混凝土更强的生命力。但高强混凝土的脆性大、延性差、耐久性也相对差,这些不足严重制约了其应用和发展。为解决高强混凝土的增韧和耐久性问题,曾开展过许多工作,但到目前为止,还没有很好的办法。而采用钢管混凝土技术,实际很好地解决了应用高强混凝土的关键问题。在钢管混凝土结构材料中混凝土的脆性、延性和耐久性问题都得到了很好的解决。

6. 制作和施工方便

与一般钢结构构件相比,钢管混凝土的钢管制作通常较简单。目前广为采用的是薄壁钢管,因而所进行的现场拼接、焊接相对简便快捷,易于制作。由于空钢管构件的自重小,还可减少运输和吊装费用,与钢筋混凝土构件相比,钢管混凝土不需要构件预制场地。与钢筋混凝土柱相比,钢管混凝土省去了绑扎钢筋、支模和拆模等工序,施工准备简单。钢管混凝土特别适用于泵送施工,采用高性能混凝土顶升泵送施工工艺时,钢管混凝土可一次性快速浇筑成功,大大加快了施工进度。

7. 经济效益好

钢管混凝土作为一种设计较为合理的复合材料和结构,不仅制作施工方便,而且可以充分发挥钢材与混凝土两种材料各自的优点,克服原有不足,并能产生一些新的优异性能,大大扩展了其应用领域和空间。大量工程实践证明,在承载力条件相同的情况下,采用钢管混凝土的承压构件比普通钢筋混凝土构件节约混凝土用量的 50%,减轻结构自身重力的 50%;与普通钢结构相比可节约钢材达 50%。综合考虑材料、施工成本,以及维护保养费用,钢管混凝土组合结构具有良好的经济效益。

第二节 钢管混凝土材料

一、钢 管

组成钢管混凝土构件的钢管在制作时需要选择钢材的品种以及成管和连接的方式,主要选择和考虑的内容是钢材的抗拉强度、刚性、塑性、冲击韧性、断裂韧性、成型性和焊接性等性能。通常制作钢管混凝土用钢管的材料可采用 3 号钢、16Mn 钢、15MnV 钢《普通碳素钢号和一般技术条件》(GB 700—79)、《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—88),它们分别相当于《碳素结构钢》(GB 700—88)中的 Q235 钢、《低合金高强度结构钢》(GB/T 1591—94)中的 Q345、Q390 钢材。中国工程建设标准化协会《钢管混凝土结构设计及施工规程》(CECS 28—90)、原国家建材工业局《钢管混凝土结构设计及施工规程》(JCJ 01—89)等规范尚未经修订,仍沿用老标准。

钢材的弹性模量和强度设计值,按表 1-1 采用。

钢材的弹性模量和强度设计值

表 1-1

钢 号	钢材厚度 t (mm)	抗拉、抗压强度设计值 f_a (MPa)	弹性模量 E_s (MPa)
3 号钢	< 20	215	206×10^3
	21 ~ 40	200	
	41 ~ 50	190	
16Mn 钢	< 6	315	206×10^3
	17 ~ 25	300	
	26 ~ 36	290	
15MnV 钢	< 16	350	206×10^3
	17 ~ 25	335	
	26 ~ 36	320	

注:3 号镇静钢的强度设计值应按表中数值提高 5%。

圆钢管的焊接方式可采用直缝焊接管、螺旋缝焊接管和无缝焊接管。一般当管径较大时采用卷制管,管径较小、价格合理时可采用无缝管。方形、矩形或多边形钢管宜采用直缝焊接管或冷弯型钢管。焊缝必须采用对接焊接,并达到与母材等强度的要求,不允许采用钢板搭接的角焊缝。

同时,钢管的直径 D 不应小于 100mm,壁厚 t 不宜小于 4mm,而且应满足 $\frac{D}{t} = (20 \sim 85) \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ 。另外,对钢管混凝土还有一个限制,即套箍指数 θ 应限制在 0.3~3.0。 $\theta > 0.3$ 的目的是防止混凝土强度过高,钢管套箍能力不足引起脆性破坏; $\theta < 3.0$ 的目的是防止混凝土强度过低导致塑性破坏。

在钢管制作完毕之后,应进行表面质量和弯曲度等方面的检查,内外表面不得有裂缝、轧折、分层、结疤等缺陷,当壁厚 $\leq 15.0\text{mm}$ 时,弯曲度应 $\leq 1.5\text{mm/m}$;当壁厚 $> 15.0\text{mm}$ 时,弯曲度应 $\leq 2.0\text{mm/m}$ 。对于圆形钢管,还应进行圆形度的误差检查。

二、混 凝 土

水泥混凝土作为一种建筑材料自问世以来,迄今已有上百年的历史,它是现代最重要的工程结构材料之一。由于混凝土结构具有许多优越性能,如易于加工成型、能耗低、耐久性好,与钢材结合可以组成各类不同特性的承重结构,并适宜于大规模的生产和施工,所以获得了广泛的应用。从一般的工业与民用建筑结构、公路与铁路桥梁、枕轨、电杆、桩、压力管道、油罐与水塔等方面到高层建筑、地下建筑、海洋结构、核电站防护壳与压力容器、大跨度空间结构与高耸塔桅结构等,混凝土结构已经成为现代不可缺少的,将来越来越被广泛使用的一种工程结构材料。2000 年我国水泥年产量为 5.8 亿吨,占世界水泥年产量的 1/3;2005 年已突破 10 亿吨,占

世界水泥总产量的一半以上。每年用这些水泥所配制的混凝土数量巨大。因此采用现代混凝土技术,研制具有良好耐久性、工作性、各种力学性能、适用性、体积稳定性和经济合理性的绿色高性能混凝土,不仅是混凝土与建筑工程持续发展的需要,同时也对人类可持续发展具有十分重要的意义。

近年来,我国在混凝土技术方面取得了长足的进步,2005年全国已建成了预制混凝土搅拌站超过1500座,设计能力超过3亿立方米。目前混凝土的最大泵送高度达382.5m,基础大体积混凝土一次连续浇灌达24000m³。在混凝土的强度等级方面,15年前,我国混凝土的平均强度只有20MPa,而现在混凝土结构的平均强度已达到C30。C40、C50已经普遍应用,而强度等级更高的C60~C80高强混凝土的工程应用范围也不断扩大。C80以上的超高强混凝土在预应力管桩构件中已有使用,如广州的国贸大厦、上海的环球金融中心、深圳的鸿昌大厦和北京的新世纪饭店等均采用了C60混凝土,个别工程还采用了C80混凝土。高强混凝土的广泛应用得到了很好的技术效果和经济效益。

高强混凝土已经成为现代混凝土技术发展的主要方向,其重要原因就是由于高强混凝土具有许多突出的优点和特性。其主要特点是强度高、变形小,能适应现代工程结构向大跨、重载、高耸方向发展和承受恶劣环境条件的需要。

但是高强混凝土也有其不足之处:首先是对各种原材料的选择、生产运输、施工管理及质量控制等各个方面的要求都较为严格;其次在材料的性能上,高强混凝土有许多突出的缺点需要解决。具体说明如下:

(1)收缩大易开裂。由于高强混凝土的水灰比低,在水化凝结硬化初期,混凝土内部大量未水化的水泥吸收毛细管中的水分,开始水化,使毛细管脱水,甚至变成真空,使水泥浆体收缩,当混凝土处于硬化早期时,抗拉强度很低,收缩力大于混凝土的抗拉强度,致使混凝土开裂。混凝土一旦收缩开裂就会降低其抗渗性能和抗碳化性能,大大影响其耐久性。

(2)混凝土中的未水化水泥进一步水化造成的开裂。高强混凝土的水灰比一般为0.20~0.30,但按Powers理论,硅酸盐水泥水灰比 $W/C \leq 0.42$ 时,水泥就不能完全水化了。一般说,高强混凝土抗渗性很好,100MPa以上的超高强混凝土基本上不碳化、不渗水、耐久性非常优异。但是Hillemeier等将 $W/C = 0.30$,28d抗压强度为130MPa的高性能混凝土放在90℃热水中加速水化,7d后就发现大量可见裂缝。Pushpalal研究了水泥水化程度极低的高铝水泥——酚醛树脂复合材料,虽然组织结构极为致密,但在20℃水中室外暴露1年后,也发现了未水化水泥的水化,其性能变化亦较大,强度损失达7%左右,从而明显影响其耐久性。如果使高强混凝土处于干燥的环境条件下,混凝土材料不与水分接触,则不会产生这种现象。

(3)延性大大降低。高强混凝土与普通混凝土相比脆性大、延性差。素混凝土的延性随强度的增加而降低,据有关资料表明,当普通混凝土的应变达到3‰时其承载力仍然能保持一半以上,但若同样的应变值赋予高强混凝土时,则实际承载力近于零。混凝土中由于湿度、温度梯度产生的应变,往往达到或超过3‰,在这种情况下,在混凝土中会有裂纹形成。如何补偿高强混凝土的韧性损失,进一步推广高强混凝土技术是目前迫切需要解决的问题。

针对高强混凝土材料性能上主要存在的3方面问题,众多学者从不同的角度进行了研究,希望解决高强混凝土的开裂和韧性降低的问题。例如,改善高强混凝土的配合比设计,掺加矿物混合材以及有机聚合物,增强纤维等方法,虽然在不同程度上都取得了一些效果,但目前还

没有一个较好的解决方法。而现代材料设计技术的发展为解决高强混凝土材料性能缺陷提供了有力的技术保障,其基本的技术思路如下:

(1)如前所述,不论何种原因引起高强混凝土的体积不稳定性,都能导致裂纹,但最常见的是在限制条件下因收缩而引起的开裂。根据吴中伟教授提出的“中心质”假说概念,水泥基材料是多相复合材料,由固、液、气三相组成,其中液相与气相组分(即孔缝)在“中心质”假说中称为负中心质。当孔缝尺度超过不同限度时,就会带来渗漏、强度降低、耐久性变差,从而导致结构破坏。如果我们采用膨胀水泥混凝土或在普通水泥混凝土中合理引入膨胀材料,利用膨胀来补偿这种收缩,就可以减免混凝土裂缝的产生与发展,从而提高高强混凝土的耐久性。

(2)解决高强混凝土脆性大的问题,一个有效途径就是将高强混凝土置于约束状态之下,可采用的办法是设置普通箍筋或螺旋箍筋,以及焊接钢筋网等。它们的共同功能就是当混凝土纵向受压发生横向膨胀变形时,能提供给混凝土侧向约束力从而提高混凝土的延性。而利用钢管来约束高强混凝土,则使后者具有良好的延性,解决了高强混凝土延性差的问题,实现材料性能优化。

将普通钢管混凝土中的核心混凝土选用为高强膨胀混凝土,将高强、膨胀和钢管约束三种条件结合起来,从而形成了一种新型的钢管混凝土结构——钢管高强膨胀混凝土。该种结构具有很多优点,它不但能够解决高强混凝土在性能上存在的诸多重要问题,而且还能大幅度改善普通钢管混凝土的工作性能。其主要特色如下:

(1)解决脆性问题。通过钢管侧向约束限制作用对核心混凝土形成三维约束,即通过钢管对核心混凝土的紧箍作用,提高了核心混凝土的抗压强度和弹性模量,同时塑性、韧性也大为改善。而核心混凝土则保证了钢管的局部稳定。对于普通钢管高强混凝土而言,受荷初期,由于核心混凝土的横向变形系数较小,约在 0.16~0.25 之间,而钢材的横向变形系数约在 0.283 左右,所以在同样的纵向压应变下,钢管的横向应变要大于核心混凝土的横向应变,因此在受荷初期钢管的径向及环向应变呈负值,人们习惯称之为“负紧箍力”。这说明,在这一段钢管对核心混凝土非但不产生紧箍作用,反而有逐渐脱离的倾向,这对构件的性能是不利的。随着荷载的增加,核心混凝土的横向变形系数逐渐增大,钢管与核心混凝土之间的相互作用随之增加,即产生了相互约束的紧箍力,但这种紧箍力在钢管处于弹性及弹塑性段时很小,因此这一段其承载力基本上为两者的代数和。进一步加荷,钢管的泊松比由 0.283 逐渐增至 0.5 左右,而核心混凝土的横向变形系数开始超过钢材的泊松比,核心混凝土裂缝逐渐扩展,紧箍力增大,钢管对核心混凝土形成全约束状态,承载能力由此提高。从上面的分析可以看出,紧箍的产生和发展是在加载后期,而实际结构中,这种优势体现并不充分,若能在加载之前就使钢管核心混凝土之间产生较大的紧箍,将会使构件的工作性能得到进一步改善。基于这种理论,高强膨胀混凝土恰恰能够使核心混凝土在受荷之前就产生紧箍力,可弥补普通钢管混凝土紧箍力出现太迟的缺陷,从而改善组合材料的工作性能。

(2)解决后期体积稳定性和表面泌水问题。通过钢管的约束限制作用和阻隔作用,切断了核心混凝土与外界的水分交换,这样不但避免表面泌水造成的裂纹,消除由于养护不及时而造成施工问题,而且不必再担心核心混凝土后期膨胀造成的体积破坏,另外还可以完全消除由于膨胀剂的掺量太大或施工管理不善等种种内外因素波动而造成的体积变化不确定性所带来的危害,因此可以确定地讲,钢管高强膨胀混凝土是较钢管高强普通混凝土更为合理的形式。

第三节 钢管混凝土的发展

一、钢管混凝土的发展概况

钢管混凝土在桥梁墩柱、建筑物柱等部位的应用已经有上百年的历史,但其早期的应用中并没有考虑到组成钢管混凝土的钢管及其核心混凝土间存在相互作用对承载力提高的影响。最早有关钢管混凝土的应用报道是 1879 年建成的英国 Severn 铁路桥的桥墩,当时是为了防锈而将混凝土灌入空的钢管中。Sewell.J.S.于 1901 年报道了方形钢管混凝土柱的应用情况,并指出钢管内填充混凝土不仅可防锈,还能提高结构的刚度和承载力。法国 Conidere 于 1902 年开始探索三向应力混凝土性能,也证实了套箍(约束)状态下混凝土能提高其承载力。1907 年美国的 Lally 公司首次给出了圆形钢管混凝土柱的安全承载能力公式。

前苏联从 1931 年开始先后进行了大量有关钢管混凝土柱的试验工作,出版了一些相关专著,并在 20 世纪 30 年代末期将钢管混凝土结构应用于桥梁建筑,包括跨越列宁格勒涅瓦河的跨径为 101m 钢管混凝土拱梁组合体系桥、罗斯洛夫斯基设计的跨径 102m 双管拱勒式拱桥,以及位于西伯利亚跨径达 140m 的钢管混凝土桁拱。在 20 世纪 50~60 年代对钢管混凝土结构进行了系统的研究,并在工业厂房、空间结构和拱桥结构中应用。

英国 Neogi 等人于 20 世纪 60 年代对钢管内核心混凝土三向受力时强度的提高,以及考虑钢管对混凝土约束效应时钢管混凝土承载力的计算方法进行了研究,是钢管混凝土理论探讨上的一大突破。英国于 1996 年建成的四层城市立交桥(Almondsbury),采用了钢管混凝土柱。实践表明,钢管混凝土在满足承载力的前提下,不仅最大限度减少了桥墩和支柱的尺度,而且增加了建筑美观。

美国于 1963 年将轴心受压钢管混凝土柱的计算公式列入美国混凝土学会的相关规范中,1973 年把钢管混凝土构件作为组合体单独分列,并把受弯计算也一并列入修改的规范中。1960 年修建于旧金山一座 50 层办公楼就采用了钢管混凝土。在修建钢管混凝土高层建筑的同时,又修建了跨越超速干道的架空停车场,该桥的跨度为 175.5m,拱桥上弦压杆的钢管混凝土直径为 1.83m。

日本 1923 年关西大地震后,人们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)高层建筑中大量应用了钢管混凝土。在 20 世纪 50 年代,把钢管混凝土用于地下铁道车站柱和送电铁塔桁架构件。1967 年日本建筑学会颁布了《钢管混凝土结构设计规范》,1980 年对此规范进行了修订,1987 年又颁布了《钢管构造设计施工指南》。最近修建了主跨为 180m 钢管混凝土劲性骨架的箱形断面的上承式青叶大桥。

我国从 1959 年开始研究钢管混凝土的基本性能和应用。国内苏州混凝土与水泥制品研究院、原哈尔滨建筑工程学院、冶金建筑科学研究总院、国家电力研究所及中国建筑科学研究院等单位先后对钢管混凝土组合结构开展了比较系统的研究工作,主要集中在基本构件的力学性能、设计方法、节点构造、施工技术和耐火性能等方面。20 世纪 60 年代中期,钢管混凝土开始在一些厂房柱和地铁工程中采用。20 世纪 70 年代后期,这类结构在冶金、造船、电力等行业的单层或多层工业厂房得到了广泛的应用。20 世纪 90 年代后期,钢管混凝土结构在 20~88 层高层建筑、大型场馆中也得到了广泛的推广应用,例如:深圳地王大厦、赛格广场,哈尔滨