



土木工程结构研究新进展丛书

钢管高强混凝土组合柱 受力性能及设计方法

康洪震◎著

中国建筑工程出版社

014035412

TU528. 59
04

唐山学院学术专著出版基金资助出版

土木工程结构研究新进展丛书

钢管高强混凝土组合柱受力性能及设计方法

康洪震 著



中国建筑工业出版社



北航

C1715324

TU528.59
04

图书在版编目 (CIP) 数据

钢管高强混凝土组合柱受力性能及设计方法/康洪震
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2014. 3
(土木工程结构研究新进展丛书)
ISBN 978-7-112-16367-0

I. ①钢… II. ①康… III. ①钢管混凝土-高强混凝土-组合柱-受力性能-研究②钢管混凝土-高强混凝土-组合柱-设计-研究 IV. ①TU528

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 019555 号

钢筋高强混凝土组合柱 (简称组合柱) 是一种新型的承重和抗侧力竖向构件, 同时又是一种受力性能复杂的结构构件。本书采用试验和理论分析相结合的方法, 研究钢管高强混凝土组合柱轴心抗压和水平往复荷载作用下的受力性能。全书共分 8 章, 主要内容: 绪论、钢管高强混凝土组合柱轴心抗压试验、钢管高强混凝土组合柱轴压承载力极限状态分析、钢管高强混凝土组合柱轴心抗压数值分析、钢管高强混凝土组合柱抗震性能试验研究、钢管高强混凝土组合柱正截面承载力计算、大尺寸钢管高强混凝土组合柱抗震性能研究、钢管高强混凝土组合柱抗震性能数值模拟。

* * *

责任编辑: 杨 允
责任设计: 张 虹
责任校对: 姜小莲 刘梦然

土木工程结构研究新进展丛书
钢管高强混凝土组合柱受力性能及设计方法
康洪震 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
北京红光制版公司制版
北京建筑工业印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 8 字数: 200 千字

2014 年 3 月第一版 2014 年 3 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-16367-0
(25087)

版权所有 翻印必究
如有印装质量问题, 可寄本社退换
(邮政编码 100037)

前 言

钢管高强混凝土组合柱（简称组合柱）是一种新型的承重和抗侧力竖向构件，同时又是一种受力性能复杂的结构构件。本书采用试验和理论分析相结合的方法，研究组合柱轴心抗压和水平往复荷载作用下的受力性能。研究工作和成果主要有以下几个方面：

（1）通过 18 个组合柱试件的轴心抗压试验，研究了试件破坏过程、破坏形态、承载力等，分析了套箍指标、混凝土强度和钢管外混凝土配箍特征值对轴压受力性能的影响。提出了组合柱短柱轴心受压承载力计算公式，通过计算有关文献组合柱试件的轴压承载力，验证了公式的正确性。

（2）通过对组合柱轴心抗压过程应变的分析，定义了组合柱轴心受压承载力极限状态；根据组合柱中钢管混凝土和管外钢筋混凝土纵向变形一致的试验结果，利用材料本构关系，推导了组合柱轴压承载力理论计算公式，建议了钢管混凝土套箍指标的取值范围；分析了钢管内外混凝土面积比对组合柱轴压承载力的影响，给出了面积比限值计算方法。

（3）利用高强混凝土及钢管混凝土本构关系，对组合柱轴压受力全过程进行了数值计算，并与钢筋混凝土柱进行了对比分析，进一步探讨了组合柱轴心抗压受力机理，定量分析了套箍指标、混凝土强度和配箍特征值对轴压承载力和纵向应变延性的影响。

（4）通过对 10 根钢管高强混凝土组合柱在定轴力和水平往复荷载作用下的拟静力抗震性能试验，研究了组合柱的破坏形态、截面应变分布，分析了轴压比和配箍特征值对水平力-位移滞回曲线、变形能力和耗能能力的影响；提出了组合柱的轴压比计算方法和体积配箍率计算方法。

（5）在组合柱抗震性能试验的基础上，对组合柱压弯受力性能进行了分析，从组合柱中钢管混凝土和管外钢筋混凝土轴力分配入手，应用平截面假定和塑性理论下限原理，研究了组合柱正截面承载力计算方法，提出了简单可行的计算组合柱正截面承载力的叠加方法。

（6）对 6 个（3 组）大尺寸钢管混凝土组合柱试件进行了水平反复荷载作用下的压弯性能试验，试件的主要参数为箍筋间距和加载次数。考察组合柱的抗震性能，研究了不同的体积配箍率计算方法和加载次数对组合柱抗震性能的影响。

（7）以 16 根钢管高强混凝土组合柱抗震试验结果为依据，基于有限元软件 OpenS-EES（Open System for Earthquake Engineering），建立了组合柱滞回分析的纤维单元模型，模拟结果与试验结果对比，充分证明了数值分析的有效性和正确性。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景和意义	1
1.2 相关领域的研究及应用现状	3
1.3 主要内容	14
第 2 章 钢管高强混凝土组合柱轴心抗压试验	15
2.1 引言	15
2.2 试验概述	15
2.3 试验结果	18
2.4 轴心抗压承载力分析	23
2.5 本章小结	28
第 3 章 钢管高强混凝土组合柱轴压承载力极限状态分析	29
3.1 引言	29
3.2 钢管高强混凝土组合柱轴压承载力极限状态	29
3.3 钢管高强混凝土组合柱轴心受压承载力计算	32
3.4 理论方法与试验方法比较	36
3.5 本章小结	39
第 4 章 钢管高强混凝土组合柱轴心抗压数值分析	40
4.1 引言	40
4.2 材料本构关系	40
4.3 钢管高强混凝土组合柱轴力-纵向应变曲线数值计算	42
4.4 组合柱与钢筋混凝土柱轴压性能比较	46
4.5 本章小结	51
第 5 章 钢管高强混凝土组合柱抗震性能试验研究	53
5.1 引言	53
5.2 试验概况	53
5.3 试验结果与分析	58
5.4 本章小结	70

第 6 章 钢管高强混凝土组合柱正截面承载力计算	71
6.1 引言	71
6.2 试验组合柱 $N-M$ 相关曲线	71
6.3 组合柱正截面承载力计算方法	73
6.4 计算结果及比较	77
6.5 建议方法	81
6.6 本章小结	82
第 7 章 大尺寸钢管高强混凝土组合柱抗震性能研究	84
7.1 试验设计及内容	84
7.2 试验结果及分析	88
7.3 本章小结	101
第 8 章 钢管高强混凝土组合柱抗震性能数值模拟	103
8.1 引言	103
8.2 OpenSEES 软件简介	103
8.3 纤维模型和构件单元模型	103
8.4 材料本构关系	104
8.5 建模过程	107
8.6 影响因素分析	110
8.7 有限元数值分析结果	112
8.8 本章小结	116
参考文献	117

第1章 绪 论

1.1 背景和意义

1.1.1 钢管高强混凝土组合柱概念

由截面中部钢管混凝土和钢管外钢筋混凝土叠合而成的柱称为钢管混凝土叠合柱。叠合柱包括不同期施工的叠合柱和同期施工的叠合柱，同期施工的叠合柱也可称为组合柱。不同期施工是指：先浇筑管内混凝土，成为钢管混凝土柱，承受部分施工期的竖向荷载，后浇筑管外混凝土。同期施工是指：同时浇筑钢管内混凝土和钢管外混凝土^[1]。图 1.1 为一典型钢管混凝土叠合柱截面形式。

由于钢管的存在，叠合柱中钢管内外混凝土可以设计为不同强度，管内混凝土为 C50 以上时可称为钢管高强混凝土叠合柱，同期施工时可称为钢管高强混凝土组合柱。

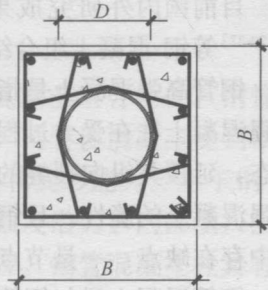


图 1.1 叠合柱截面形式

1.1.2 背景

现代工程不断向超高层、重载、大跨和巨型方向发展，常规的结构材料和构件形式已不能完全适应这种发展的需要。高强混凝土作为混凝土材料的重要发展方向，以其耐久性好、强度高、变形小等特点，已被广泛应用于高层建筑、桥梁、港口海洋工程、地下工程等土木工程领域中^[2]。

高层建筑中采用高强混凝土可以大幅度减小底层钢筋混凝土柱的截面尺寸，扩大柱网间距，增大建筑使用面积。高强混凝土还因徐变小、弹性模量高，可以减小柱子的压缩量和增加结构刚度，这对超高层建筑来说也是非常重要的。美国是将高强混凝土最早用于高层建筑的国家，在 20 世纪 70~80 年代修建了大量工程，其中最高的一幢钢筋混凝土高层建筑位于芝加哥，共 79 层，高 197m，建筑面积 15.8 万 m²，底层柱的混凝土强度相当于我国的 C95。建筑工程中应用混凝土强度最高的是建于 1989 年的美国西雅图的双联大厦和太平洋第一中心，这两幢高层建筑采用钢管混凝土柱，混凝土的强度等级相当于 C120，目的是为了增加钢管混凝土柱的刚度。

我国对高强混凝土的研究和应用起步较晚。1988 年在沈阳建成的 18 层的辽宁省工业技术交流馆，首次在高层建筑的柱中采用了 C60 级的混凝土。1989 年北京新世纪饭店 35 层的客房楼底层柱采用了 C60 级混凝土。1990 年 8 月上海海仑宾馆工程和 1990 年 9 月上海新新美发厅工程成功地进行了泵送 C50~C60 高强混凝土的工程实践。从 1995 年起，北京、上海、广州、深圳陆续开始 C80 商品混凝土的供应，并在个别工程中得到应用。

尽管采用高强混凝土能带来明显的社会效益,但仍有许多亟待解决的问题。问题之一是高强混凝土是脆性材料^[3-6],混凝土强度越高,脆性越显著,使高强混凝土结构构件的延性性能越低。而有抗震要求的高强混凝土结构需要有较好的延性,通常采用限制轴压比和增大配箍特征值来保证高强混凝土结构有较好的延性。若对高强混凝土柱的轴压比限制过严,会使截面尺寸较大,降低经济效益,且易形成短柱,造成脆性剪切破坏。提高配箍特征值即增加体积配箍率,虽然对高强混凝土柱的延性有一定改善,但达到一定程度后效果并不显著,清华大学的试验研究表明^[7-11],当柱轴压比较大时,已很难通过增加体积配箍率的办法使C80 高强混凝土柱的延性性能达到C30 普通混凝土柱的水平。同时体积配箍率过大给施工带来困难,不易保证工程质量。问题之二是高强混凝土的耐火性能不如普通混凝土^[12-14],高温下高强混凝土随过火温度的提高抗压强度急剧下降。上述问题的存在,一定程度上阻碍了高强混凝土结构的推广应用。在“第三届高强与高性能混凝土及其应用学术讨论会”上,专家学者基本达成共识:在实际工程中,若没有较好的办法解决高强混凝土构件延性差、破坏突然等缺点,应慎用高强或超高强混凝土^[15]。

目前国内外研究成果及应用经验表明,采用钢管高强混凝土^[16-28]和钢骨高强混凝土^[29-37]等钢-混凝土组合结构是解决上述问题的有效途径。

钢管高强混凝土是指将高强混凝土填入薄壁圆形钢管内而形成的组合结构材料。钢管高强混凝土柱在受力过程中,钢管对受压混凝土施加侧向约束,使其处于三向受压的应力状态,延缓其纵向裂缝的发生和发展,从而提高其抗压强度和受压变形能力,有效地克服高强混凝土的脆性。且钢管内无钢筋骨架,便于浇筑高强混凝土。但钢管混凝土在实际应用中存在缺点:一是节点处理比较困难,由于我国高层建筑仍大多采用钢筋混凝土梁板楼盖,钢筋混凝土梁与钢管混凝土柱连接节点构造复杂;其次,钢管混凝土柱用在高层建筑的底层时,由于竖向荷载较大,需要大直径的钢管,所以其用钢量偏大,且需要严格的焊接质量保证;再次,钢管表面需要做防火、防腐处理,从而提高了造价和维护费用。

钢骨混凝土柱是把型钢埋入钢筋混凝土中形成的组合构件,型钢钢骨与外围混凝土共同工作。其优点是:外围混凝土能防止钢骨的局部失稳,并保护其不受外界环境影响,起到防火和防腐作用;钢骨分担部分轴力,减小外围混凝土的轴压比,可显著提高柱的承载力和变形能力。

为了克服钢管混凝土柱与钢筋混凝土梁连接复杂及钢管外露造成防火和防腐能力弱的缺点,借鉴钢骨混凝土的思考方法,在工程实践中发展并形成了钢管高强混凝土叠合柱的概念。这一概念最早由辽宁建筑设计研究院在设计实践中提出和发展起来^[38-42],1996年建成的辽宁物产大厦(28层,高101m),就是采用钢管高强混凝土组合柱,底层柱截面尺寸900mm×900mm,核心处设置一直径299mm钢管,钢管内外浇筑C80 高强混凝土。随后建成的沈阳和泰大厦,则把C80 混凝土用于核心钢管内,外围混凝土仍用C50,这种用法比前者更加合理,取得了良好的经济效益。

1.1.3 目的和意义

钢管混凝土叠合柱是一种新型钢筋混凝土抗震结构构件。叠合柱从概念的提出到现在只有十年左右的时间,这种新型柱概念合理,是在地震区应用高强混凝土的一种可靠、有效、经济的手段,有很好的研究和应用前景。近年来,国内学者对其进行了一定的试验和

理论研究^[39,42-48],但对钢管高强混凝土叠合柱的受力机理、破坏形态以及设计方法还没有形成较完善的系统理论。本文将对钢管高强混凝土叠合柱中同期施工的组合柱进行部分试验、计算和理论研究工作,希望能够对促进叠合柱的研究和应用有所帮助。可以相信,随着钢管高强混凝土叠合柱研究的深入和设计理论的不断完善,不仅可以促进高强混凝土在抗震结构中更广泛的应用,同时也有助于推动钢-混凝土组合结构的研究与发展。

1.2 相关领域的研究及应用现状

钢管高强混凝土叠合柱是一种新型组合构件,目前国内外研究与应用相对较少。与钢筋混凝土柱相比较,影响其主要性能的是柱截面中部的钢管混凝土;同时钢管高强混凝土组合柱仍属于钢-混凝土组合结构,与钢骨高强混凝土组合结构紧密相关。本章对钢管高强混凝土和钢骨高强混凝土及已有的钢管混凝土叠合柱的研究现状进行综述。

1.2.1 钢管高强混凝土柱

1. 钢管混凝土柱的特性

钢管混凝土柱是将混凝土注入封闭的薄壁钢管内形成的钢-混凝土组合构件。钢管混凝土柱可以充分发挥钢管与混凝土两种材料的作用。对于混凝土,钢管使混凝土受到横向约束而处于三向受压状态,从而使管内混凝土有更高的抗压强度和变形能力。对于钢管,由于钢管壁较薄,在受压状态下容易局部失稳而不能充分发挥其强度潜力。内部填入混凝土后,大大增强了钢管壁的稳定性,使其强度潜力可得到充分发挥。钢管混凝土柱具有强度高、重量轻、塑性好、耐疲劳、耐冲击等优点。由于钢管能对混凝土提供连续的约束,且钢管具有很大的抗剪和抗扭能力,故可以有效地克服高强混凝土脆性大、延性差的弱点,使高强混凝土的工程应用得以实现,经济效果得以充分发挥。

工程应用表明,在建筑物中采用钢管混凝土柱替代钢柱,可以大大节约钢材;替代钢筋混凝土柱,则在用钢量大体相同的情况下可减少柱截面面积50%左右,相应地节约大量混凝土^[23]。

2. 钢管混凝土柱的应用与发展现状

建筑工程中应用钢管混凝土结构已有百年的历史。20世纪初,美国就在一些单层和多层结构中,采用了圆形钢管混凝土柱。苏联于20世纪30年代,用钢管混凝土建造了跨度为101m的公路桥。此后在西欧、北美、日本、苏联等工业发达国家,钢管混凝土结构在工业厂房、多层和高层建筑、立交桥以及特种工程中得到较多的应用,收到了良好的效果。例如,美国1989年建造的西雅图58层的Two Union Square,总高219.5m,其核心筒采用四根钢管混凝土柱,柱直径3.04m,采用C110高强混凝土浇筑,可承担总荷载的40%,与钢结构方案比较,节省钢材50%,降低造价30%。

我国对钢管混凝土结构技术的研究始于20世纪60年代。1963年成功地将钢管混凝土柱用于北京地铁车站工程,20世纪70年代将其用于冶金、造船、电力等部门的单层厂房和重型构架中,此后随着研究的逐步深入,又相继将其用于大跨度桥梁工程以及高层建筑的框架中。近年来,采用钢管混凝土柱的高层建筑日益增多,这是因为在高层建筑中,底部柱的轴压力往往很大,但建筑物中通常不希望柱尺寸过大,加上抗震要求,柱应具有较

好的延性,在施工方面要求缩短工期、施工方便,而钢管混凝土柱完全可以满足这些要求。例如深圳赛格广场大厦,地上 72 层,地下 4 层,总高度 291.6m,是我国第一座自行设计、自行施工的采用钢管高强混凝土柱的超高层建筑,也是目前世界上最高的一座钢管混凝土高层建筑。目前,国内已建的钢管混凝土拱桥和采用钢管混凝土柱的高层建筑已有 100 多座(幢),取得了良好的经济效益和社会效益^[23,24,26]。

20 世纪 60 年代,英国 Ncogi P K 等人^[49]研究了钢管内的混凝土三向受力时强度的提高问题,并提出了考虑钢管对混凝土约束效应条件下钢管混凝土承载力的计算方法,这是钢管混凝土理论研究的一大突破。这一时期,美国的 Knowles R B 和 Park R 等人^[50,51]亦通过大量试验研究了钢管混凝土柱的受力性能,取得了很多成果。在试验与理论研究的基础上,一些国家相继编制了钢管混凝土结构设计规范,主要有欧洲标准化委员会编制的 EC4,英国的 BS5400,美国的 ACI318-89 和 AISC-LRFD (1994),日本的 AIJ (1980, 1997)^[51]。

自 20 世纪 50 年代以来,国内的哈尔滨建筑大学、中国建筑科学研究院以及苏州混凝土和水泥制品研究院等单位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。目前,国内关于钢管混凝土结构的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:国家建材工业局编制的《钢管混凝土设计与施工规程》JCJ 01—89^[52],中国工程建设标准化协会编制的《钢管混凝土结构设计及施工规程》CECS 28:90^[53]和电力行业编制的《钢-混凝土组合结构设计规程》DL/T 5085—1999^[54]。

目前对钢管混凝土的研究主要集中在以下几个方面:

(1) 钢管混凝土结构的耐火能力不如钢骨混凝土结构,但远好于钢结构,开展钢管混凝土结构火灾下性能的研究,将为结构的耐火处理和火灾后结构的维修加固提供科学的依据^[55-57];

(2) 早期对钢管混凝土抗震性能的研究主要集中在基本构件方面,随着试验手段的提高,目前已开始进行钢管混凝土结构体系抗震性能的试验研究,这将为结构体系的抗震设计提供重要的依据^[21,58-61];

(3) 尽管方形或矩形钢管对管内混凝土的约束能力较圆形钢管差,但与圆形钢管混凝土柱相比,方形或矩形钢管混凝土柱具有节点连接方便,结构处理简单等优点,是目前研究的课题之一^[62-67];

(4) 钢管混凝土柱、梁节点设计在钢管混凝土结构设计中是非常关键的环节,设计受力合理、传力明确、施工简便的节点形式,将有力推动钢管混凝土结构的应用与发展。目前国内外一些科研机构结合工程实际,开展了这一方面的研究^[68-71];

(5) 由于钢管的约束作用可较大提高高强混凝土的延性,使其工程应用得以实现,因此,近年来国内外有关学者对钢管高强混凝土的力学性能开展了一系列研究^[16-22,72-75]。此外还开展了自应力钢管混凝土的研究,通过在混凝土中加入膨胀剂、聚酯树脂等来改善混凝土的性能,进而达到提高钢管混凝土柱的承载力和抗震性能等目的^[76,77]。

3. 钢管混凝土柱的主要研究成果

钢管混凝土柱在受力过程中钢管和混凝土之间将产生相互作用效应,这种效应导致了钢管混凝土柱物理力学性能的复杂性,因此如何估算这种效应成为确定钢管混凝土柱承载力的基本问题。各国学者基于试验研究结果,从不同的角度对这一问题进行了研究,提出

了各自的承载力计算方法。

综合国内外研究成果,钢管混凝土受力性能主要与下面几个参数相关:

(1) 长径比 L/D

钢管混凝土的长径比是指钢管混凝土柱的长度 L 与钢管混凝土外直径 D 之比,该参数是划分钢管混凝土为长柱与短柱的标准。一般 $L_0/D \leq 4$ 的圆钢管混凝土柱看成是短柱, L_0 为柱的计算长度。

(2) 径厚比 D/t

径厚比是指钢管的外直径 D 与钢管壁厚 t 的比值,它是划分薄壁钢管混凝土和厚壁钢管混凝土的标准。文献 [23] 建议径厚比 $D/t < 19$ 时为厚壁钢管混凝土。厚壁钢管混凝土受力时钢管壁内的应力分布不均匀,核心混凝土所承担的荷载比例下降,其力学性能与薄壁钢管有所区别。一般认为宜采用薄壁钢管高强混凝土,高强混凝土可以承担大部分轴力,取得结构与经济效益的统一。

(3) 套箍指标 θ

套箍指标是反映钢管混凝土中钢管对核心混凝土约束作用的重要参数,可表示为 $\theta = f_a A_a / (f_c A_c)$, f_a 和 A_a 分别为钢管的屈服强度和钢管的截面面积, f_c 和 A_c 分别为混凝土轴心抗压强度和截面面积。套箍指标越大,钢管对混凝土的约束作用越大,混凝土的强度提高也就越大。

4. 混凝土强度

研究表明,钢管内混凝土强度是影响钢管提供约束能力的一个参数。由于钢管混凝土属于被动约束混凝土,混凝土强度越高,脆性越大;高强混凝土另一个缺点是自收缩较大,强度越高自收缩性越大。因此,混凝土强度影响钢管对混凝土的约束性。一般认为,相对于钢管普通混凝土,钢管高强混凝土的强度提高得要小。

对于钢管混凝土短柱轴压承载力的计算,日本的规范^[31]采用了简单的累加方法,没有考虑钢管与混凝土间相互作用力引起的混凝土强度的提高。美国的规范也未考虑钢管对混凝土的紧箍力作用效应。欧洲、英国的设计规范考虑了圆形钢管对混凝土的约束作用。在文献 [78] 中,作者比较了 EC4、BS5400 和 AISC-LRFD 三个规范的不同,并与一些试验结果进行了对比,结果显示采用这三个规范计算出的结果均偏于安全,其中 EC4 计算的结果与试验值最为接近,而 AISC-LRFD 规范由于不计钢管对混凝土的约束效应,因而给出的计算结果最小。三个规范在确定钢管混凝土柱的稳定系数 φ 时,均采用了与钢筋混凝土柱相似的方法,即通过确定相对长细比,由纯钢柱屈曲曲线来确定 φ 值。

总结国内学者的研究结果,钢管混凝土极限承载力计算方法主要分为三类:一是极限平衡理论^[23];二是钢管混凝土统一理论^[24];另一类是半经验半理论方法^[52]。

(1) 极限平衡理论方法

极限平衡理论是把钢管和混凝土看作一个构件的两个元件,钢管和混凝土共同承受轴力,钢管为混凝土提供约束,使混凝土处于三向受压状态,混凝土横向膨胀,使钢管处于竖向受压和环向受拉状态,当他们达到各自的极限状态时所能承受的轴力就是钢管混凝土轴心受压短柱的极限承载力。计算公式为:

当套箍指标 $\theta \leq 1.235$ 时,

$$N_0 = f_c A_c (1 + 2\theta) \quad (1-1)$$

当套箍指标 $\theta > 1.235$ 时,

$$N_0 = f_c A_c (1 + \sqrt{\theta} + 1.1\theta) \quad (1-2)$$

在实际应用时, 可以进一步简化为:

$$N_0 = f_c A_c (1 + \sqrt{\theta} + \theta) \quad (\theta > 1) \quad (1-3)$$

式中, θ 为钢管混凝土套箍指标, $\theta = f_a A_a / (f_c A_c)$; f_c 和 A_c 分别为混凝土轴心抗压强度和截面面积; f_a 和 A_a 分别为钢管的屈服强度和截面面积。

上述公式适用于普通强度的混凝土。由于高强混凝土变形小、弹性模量大, 相同条件下钢管对高强混凝土约束作用比普通混凝土小。在试验结果的基础上, 对上述公式进行修正, 得到钢管高强混凝土轴压短柱的极限承载力为:

当套箍指标 $\theta \leq 2.04$ 时

$$N_0 = f_c A_c (1 + 1.8\theta) \quad (1-4)$$

当套箍指标 $\theta > 2.04$ 时

$$N_0 = f_c A_c (1 + \sqrt{\theta} + 1.1\theta) \quad (1-5)$$

对于钢管混凝土长柱, 当 $L_0/D \leq 20$ 时, 考虑长径比折减系数 φ_l 。

$$\varphi_l = 1 - 0.115 \sqrt{L_0/D - 4} \quad (1-6)$$

式中, L_0 为柱的等效计算长度; D 为钢管的直径。

极限平衡理论在试验的基础上对长柱极限承载力进行修正, 得到了钢管混凝土压弯构件的极限承载力 N_u :

$$N_u = \bar{\varphi} N_0 \quad (1-7)$$

$$\bar{\varphi} = \varphi_l \cdot \varphi_e \quad (1-8)$$

$$\varphi_e = 1 / (1 + 1.85e_0/r_c) \quad (e_0/r_c \leq 1) \quad (1-9)$$

式中, e_0 为钢管混凝土轴力的初始偏心距; r_c 为核心混凝土横截面半径。

规程 CECS 28: 90 采用极限平衡理论。

(2) 钢管混凝土统一理论方法

钢管混凝土统一理论将钢管混凝土看作一种组合材料, 这种组合材料具有与其他材料相同的力学变量, 钢管混凝土轴心受压短柱的极限承载力就由钢管混凝土组合材料的强度和截面尺寸确定:

$$N_0 = f_{sc} A_{sc} \quad (1-10)$$

式中, f_{sc} 为钢管混凝土组合材料的屈服强度; A_{sc} 为钢管混凝土截面面积。

对于轴心受压钢管混凝土柱, 将对应于纵向应变 $\epsilon \approx 3000 \times 10^{-6}$ 的应力作为钢管混凝土组合材料的抗压强度标准值 $f_{sc,k}$:

$$f_{sc,k} = (1.212 + B\zeta + C\zeta^2) f_{ck} \quad (1-11)$$

式中, B 和 C 为试验得到的计算系数: $B = 0.1759 f_s / 235 + 0.974$, $C = -(0.1038 f_{ck} / 20) + 0.0309$; f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值; ζ 为套箍系数, $\zeta = f_s A_s / (A_c f_{ck})$ 。

对于钢管混凝土长柱, 是在短柱承载力的基础上, 以稳定系数 ψ 来考虑承载力的降低, 即:

$$N_0^l = \psi N_0 \quad (1-12)$$

$$\psi = \sigma_{cr} / f_{sc,k} \quad (1-13)$$

式中, σ_{cr} 为轴压构件考虑初始偏心距为 $L_0/1000$ 时, 按偏心受压构件确定的构件临界应力, 参见文献 [24] 计算方法。

由于将钢管视为一种组合材料, 可以参照钢筋混凝土压弯构件极限承载力的计算方法得到钢管混凝土的 $N-M$ 的相关曲线, 即压弯极限承载力为:

$$\frac{N}{1.4N_0} + \frac{M}{M_0} = 1 \quad (N/A_{sc} < 0.2f_{sc}) \quad (1-14)$$

$$\frac{N}{N_0} + \frac{M}{1.071M_0} = 1 \quad (N/A_{sc} \geq 0.2f_{sc}) \quad (1-15)$$

式中, N 和 M 分别为钢管混凝土压弯构件的轴力和弯矩; N_0 和 M_0 分别为钢管混凝土轴压极限承载力和受弯极限承载力, 且:

$$M_0 = \gamma_m W_{sc} f_{sc} \quad (1-16)$$

式中, W_{sc} 为钢管混凝土截面抵抗矩, 按材料力学的有关公式计算; γ_m 为塑性发展系数, 按下式计算:

$$\gamma_m = -0.445\zeta + 1.849\sqrt{\zeta} \quad (1-17)$$

规程 DL/T 5085—1999 采用上述方法。

(3) 半经验半理论方法

规程《JCJ 01—89》给出的钢管混凝土短柱轴心受压承载力的计算公式为:

$$N_0 = f_s A_s + k f_{ck} A_c \quad (1-18)$$

式中, f_s 和 f_{ck} 分别为钢管材料的屈服强度和混凝土抗压强度标准值, A_s 和 A_c 分别为钢管和混凝土的截面面积; k 为核心混凝土轴心抗压强度提高系数。

公式 (1-18) 为考虑紧箍力效应的塑性承载力计算公式, 式中的系数 k , 既包括由于紧箍力使混凝土强度提高的部分, 又包括由于钢管环向受拉而导致钢管纵向承载力降低的部分, 同时还根据试验结果作了某些调整, 因此式 (1-18) 属半经验半理论公式。

稳定系数 φ 则由失稳临界力 N_{cr} 与短柱轴压承载力 N_0 的比值确定。对于在弹性工作阶段失稳的长柱, 直接引用欧拉临界力公式计算失稳临界力。对于在弹塑性工作阶段失稳的中长柱, 首先根据实测应力-应变曲线提出经验的钢管混凝土应力-应变关系, 由此求出弹塑性工作阶段柱的受压综合切线变形模量 E_{sct} , 然后采用切线模量理论求其失稳临界力, 得:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E_{sct}}{\lambda^2} A_{sc} \quad (1-19)$$

式中, λ 为柱的长细比; A_{sc} 为钢管混凝土柱截面面积, $A_{sc} = A_s + A_c$ 。

规程《JCJ 01—89》将临界力为短柱轴压承载力一半时的构件长细比作为中长柱和长柱的界限长细比, 稳定系数的具体表达式可参见文献 [79]。

1.2.2 钢骨高强混凝土柱

1. 钢骨混凝土柱的特性

钢骨混凝土柱的特点是在钢骨的外面有钢筋混凝土, 既具有钢筋混凝土结构的特点, 又具有钢结构的特点。钢骨的形式有多种, 总体上可分为实腹式和空腹式。由于实腹式钢骨混凝土柱具有较好的抗震性能, 因此目前更多地被工程设计所采用。

钢筋混凝土柱与钢筋混凝土柱相比,由于配置了钢筋,钢筋分担部分轴力,减小了外围混凝土的轴力,从而提高了柱的延性,这就大大提高了结构的抗震性能^[30-37,80-85]。与钢柱相比,钢筋混凝土柱的外包混凝土可以防止钢构件的局部屈曲,并能提高柱的整体刚度,显著改善柱的平面扭转屈曲性能,使钢材的强度得以充分发挥。同时,外包的混凝土能防止钢材的锈蚀、延阻火灾产生的高温对钢材的影响。

2. 钢筋混凝土柱的应用与发展现状

钢筋混凝土结构在发达国家的应用比较普遍,其中日本是世界上应用钢筋混凝土结构最多的国家,也是研究钢筋混凝土结构较多、较深入的国家之一。如1981至1985年间,在16层以上的高层建筑中使用钢筋混凝土结构的建筑物占50%。即使在钢结构中,其下部1~5层也多半采用钢筋混凝土结构,这是因为高层钢结构水平刚度较小,侧向位移较大,而采用钢筋混凝土结构后,不仅提高了结构的承载力,而且水平刚度也增大很多。日本从1920年开始对钢筋混凝土结构进行试验研究,1951年以后进行了全面系统的研究,1958年制订了《钢筋混凝土结构设计规范》。此后到1987年又经过三次修订,基本形成较为完整的设计理论和方法^[86]。

钢筋混凝土结构在欧美的应用虽不及日本那样广泛,但欧美从20世纪初就已开始采用轧制型钢柱外包混凝土以提高耐火性。20世纪40年代以后开始意识到外包混凝土对提高钢柱强度和刚度的有利作用,考虑折算刚度后仍继续沿用钢柱设计方法,该方法一直沿用并编入1985年欧洲统一规范EC4《组合结构》^[87]。美国混凝土协会的规范ACI—318、美国钢结构协会的规范、英国法规BS449中都列有钢筋混凝土结构设计的相关条款。

苏联对于钢筋混凝土结构的研究和应用也相当重视,在二次世界大战后的恢复工作中,曾大量使用钢筋混凝土结构于工业厂房。1951年苏联电力建设部出版了《劲性钢筋混凝土结构设计规范》,1978年出版了《劲性钢筋混凝土结构设计指南》CH3—78^[32]。

钢筋混凝土结构在我国的应用同国外相比较少。我国于20世纪50年代从苏联引进了钢筋混凝土结构形式,由于国内节约用钢的要求,这种结构应用极少。20世纪80年代后期,随着我国经济和建筑业的迅猛发展,钢筋混凝土结构在我国迅速兴起。北京的新世纪大厦、中国国际贸易中心、京广中心等高层建筑的底部几层都采用了钢筋混凝土结构;深圳的鸿昌大厦、发展中心大厦,上海的希尔顿酒店、金茂大厦、环球金融中心大厦均采用了钢筋混凝土柱作为主要承重构件。

我国对钢筋混凝土结构的研究基本上是从20世纪80年代开始。到80年代后期,许多高校和研究院(所)对钢筋混凝土结构进行了较为系统的研究,取得了一系列研究成果。西安建筑科技大学与原冶金部建筑研究总院最早开始进行研究,继而西南交通大学、重庆建筑大学、中国建筑科学研究院、华南理工大学、东南大学、清华大学等高等院校和科研单位也开展了广泛的研究^[30,36,37,81,88-91]。1997年原冶金工业部编制并颁发了行业标准《钢筋混凝土设计规程》YB 9082—97^[29],2001年由原建设部颁发了《型钢混凝土组合结构技术规程》JGJ 138—2001^[92]。

3. 钢筋混凝土柱的主要研究成果

(1) 轴心受压承载力

在20世纪50年代以前,欧洲国家把外包混凝土仅作为钢柱的防火保护层,设计中不考虑其对柱承载力的贡献。Faber和Stevens等在试验研究的基础上,发现混凝土外包层

可有效地提高钢柱的承载力,提出了以钢柱设计方法为基础、考虑外包混凝土影响的外包钢柱设计方法。此后,Basu和Sommerville根据进一步的试验和大量计算分析,提出了换算长细比的概念,以Perry-Robertson屈曲曲线为基础,给出了轴心受压钢骨混凝土柱的屈曲曲线。Virdi和Dowling引入相对长细比概念对Basu-Sommerville的方法进行了改进,明确了钢骨混凝土柱与纯钢柱设计方法的内在关系,从而使得钢骨混凝土柱的屈曲曲线与纯钢柱曲线取得一致^[93]。该方法被英国的BS5400和欧洲统一规范EC4采用。钢骨混凝土柱轴压承载力 N_u 的计算公式为:

$$N_u = \varphi N_0 \quad (1-20)$$

$$N_0 = f_c A_c + f_y A_s + f_{ss} A_{ss} \quad (1-21)$$

式中, f_c 和 A_c 分别为混凝土的轴心抗压强度和截面面积; f_y 和 A_s 分别为钢筋的屈服强度和截面面积; f_{ss} 和 A_{ss} 分别为钢骨的屈服强度和截面面积。

钢骨混凝土柱相对长细比 $\bar{\lambda}$ 的计算表达式为:

$$\bar{\lambda} = \frac{l}{\pi \sqrt{\frac{f_c A_c + f_y A_s + f_{ss} A_{ss}}{E_c A_c + E_s I_s + E_{ss} I_{ss}}}} \quad (1-22)$$

式中, l 为柱的计算长度; E_c 、 E_s 、 E_{ss} 和 I_c 、 I_s 、 I_{ss} 分别为混凝土、钢筋、钢骨的弹性模量和截面惯性矩。

通过求解相对长细比 $\bar{\lambda}$,即可按钢结构中对不同截面形式钢柱所规定的屈曲曲线确定稳定系数 φ 。

日本规范和我国的规程亦采用简单累加的方法计算轴心受压钢骨混凝土短柱的承载力,其中长柱的稳定系数是按照考虑附加偏心距增大系数后按钢筋混凝土相关规定选取。

(2) 压弯承载力

通过确定材料的应力-应变关系,由平截面假定和截面内外力平衡条件,采用截面条带有限元法可较为准确地计算钢骨混凝土柱的压弯承载力,但该计算方法不实用。

欧洲规范则将几何非线性和材料非线性一同考虑,直接给出轴力-弯矩相关关系,概念上较为简单,但计算时需要确定四个参数,具体计算较为复杂,详见文献[94]。

苏联在《劲性钢筋混凝土结构设计指南》^[32]中采用了与钢筋混凝土柱计算理论几乎完全一致的方法,计算时将位于拉、压区的钢骨等代为其重心处的钢筋,然后按照钢筋混凝土柱正截面承载力计算方法来计算。我国规程《JGJ 138—2001》亦采用了钢筋混凝土偏心受压柱承载力的计算方法,通过将型钢腹板应力图形简化为拉压矩形应力图形计算钢骨混凝土柱的压弯承载力。

日本规范采用了叠加法计算钢骨混凝土柱的正截面承载力。该方法是将钢骨混凝土柱截面分为钢骨和混凝土两部分,分别计算两部分的承载力,然后按下述公式进行叠加:

$$N \leq N_{cy}^{ss} + N_{cu}^{rc} \quad (1-23)$$

$$M \leq M_{cy}^{ss} + M_{cu}^{rc} \quad (1-24)$$

式中, N 和 M 分别为钢骨混凝土柱承担的轴力和弯矩; N_{cy}^{ss} 和 M_{cy}^{ss} 分别为钢骨部分承担的轴力和弯矩; N_{cu}^{rc} 和 M_{cu}^{rc} 分别为混凝土部分承担的轴力和弯矩。

根据塑性理论下限定理,在任意轴力分配情况下得到的受弯承载力总是小于其真实解。按上式任意分配轴力,两部分受弯承载力之和的最大值,即为该轴力下钢骨混凝土柱

的受弯承载力。叠加方法理论上较为完善,但实际应用时要经过试算,很不方便。为此,日本规范也给出了一个简单的轴力分配原则,称为简单叠加方法。规程《YB 9082—97》也采用了该方法。同时,从上述原理出发,我国研究人员进一步提出了适用于钢骨截面为对称布置的较为准确的轴力分配方法^[95]。对于需要考虑纵向弯曲影响的钢骨混凝土中长柱,国内的两个规程均采用与《混凝土结构设计规范》GB 50010—2010 中计算柱纵向弯曲相同的方法,即偏心矩增大系数方法。

(3) 抗震性能的研究

由于钢骨混凝土结构的特殊性,各国有关钢骨混凝土的结构理论也不尽相同,主要分为偏向钢结构的允许强度理论和偏向钢筋混凝土的极限强度理论,但在钢骨混凝土结构的抗震性能的研究中基本偏向于钢筋混凝土结构的理论。

综合国内外钢骨混凝土抗震性能的试验研究,影响钢骨混凝土柱抗震性能的主要因素为:剪跨比、轴压比、配箍率和箍筋形式、含钢量和混凝土强度等。

1) 剪跨比

剪跨比是反映柱截面所承受的弯矩和剪力相对大小的一个参数,框架柱的剪跨比常近似表示为 $\lambda = H_n/2h_0$ (H_n 为柱净高, h_0 为柱截面有效高度)。剪跨比对柱抗震性能的影响主要表现在两个方面:一方面剪跨比对柱的破坏形态有显著影响,随着剪跨比由小变大,钢骨混凝土柱会发生剪切斜压破坏、剪切粘结破坏和弯曲型破坏,破坏时,延性随着剪跨比的增大而提高;另一方面,剪跨比也影响柱的受剪承载力,一般受剪承载力随着剪跨比的增大而减小,但是当剪跨比大于一定的值时,剪跨比对承载力的影响将不明显。

2) 轴压比

已有的试验结果表明,在水平荷载作用下,柱的变形能力随轴压比的增大而减小,在高轴压比的情况下,延性和耗能能力降低明显。因此,为保证钢骨高强混凝土柱具有较好的延性和耗能性能,需对其轴压比大小进行限制。在标准《钢骨混凝土结构设计规程》^[29]和《高强混凝土结构技术规程》^[98]中,通过控制轴压力系数大小来保证柱的延性。

3) 箍筋

研究表明,箍筋对钢骨混凝土柱的抗剪能力的影响不及对普通钢筋混凝土柱的影响大,但对延性的影响较大。增加箍筋可以加强对内部核心区混凝土的约束作用,从而提高混凝土的极限变形,同时保证混凝土和钢骨共同工作。在钢骨混凝土柱中,位于易出现塑性铰位置处的箍筋必须有良好的锚固措施,大轴压比情况下最好采用焊接方式。

4) 钢骨含量及形式

钢骨的含钢量是指钢骨截面面积与构件全截面面积之比。已有的试验结果表明,含钢量越大的钢骨混凝土柱,其抗震性能越好。但是钢骨混凝土柱的含钢量也要有一定的限制。若含钢量过小,钢骨对核心混凝土的约束作用不大,体现不出钢骨混凝土延性好的特点;用钢量过小,受力性能接近普通混凝土柱,体现不出钢骨混凝土构件承载能力高的特点;同时含钢量也不能太大,因为含钢量过大时,不但会造成混凝土浇筑困难,而且由于钢骨截面尺寸过大造成混凝土保护层过小,影响钢骨与混凝土之间的粘结作用,使型钢与混凝土难以共同工作,易产生粘结失效破坏。因此,各国对钢骨混凝土构件中的用钢量均有所规定,美国钢结构学会规定^[99]钢骨混凝土构件中的用钢量不得小于4.0%,否则按钢筋混凝土构件计算;日本规范^[100]将8.0%作为钢骨混凝土构件中用钢量的上限。从我国

的工程应用来看,用钢量的浮动范围较大,从2.5%到7.0%不等,文献[101]根据试验和国内外情况,建议以4.0%到8.0%作为我国钢骨高强混凝土柱合理用钢量的范围。十字形钢骨对混凝土的约束能力强,承载力下降缓慢,工字形钢骨对混凝土约束程度较小,破坏阶段外包混凝土剥落严重,且滞回环形状有明显的捏拢现象,所以十字形钢骨的柱抗震性能优于工字形的钢骨混凝土柱^[102]。

5) 混凝土强度

混凝土强度对柱的抗震性能有显著影响,随着混凝土强度等级的增加,其立方体抗压的峰值应变大而极限应变小,应力-应变曲线的下降段陡,脆性性质明显。因此,随着混凝土强度的提高,钢骨混凝土柱的延性减小,抗震性能变差^[102]。混凝土强度对柱的抗震性能有显著影响,但是到目前为止,已有的成果也只是集中在混凝土强度等级为C60和C70的钢骨混凝土柱,对混凝土强度更高(如C80)的钢骨混凝土柱的研究则还未见报导。

1.2.3 钢管高强混凝土组合柱

从组合柱概念的提出到现今的十年时间,国内学者对钢管高强混凝土组合柱作了一定的研究工作^[38-48,103-105],并在总结研究成果的基础上制定颁布了行业标准《钢管混凝土叠合柱结构技术规程》CECS 188:2005^[1],这对钢管混凝土叠合柱的工程应用起到了积极的推动作用。

1. 钢管混凝土组合柱的应用与发展现状

组合柱最早由辽宁省建筑设计院应用于大连海运集团海员公寓大厦。该建筑位于大连市中心,主体高93.8m,建筑面积21600m²,为框架-剪力墙结构。试设计采用C50钢筋混凝土柱,柱截面尺寸为1050mm×1050mm,为减小柱截面,采用了钢管混凝土组合柱,确定了柱截面尺寸为950mm×950mm,核心钢管直径300mm,壁厚10mm,钢管内外均采用C50混凝土。由于采用组合柱,柱混凝土用量减少了19%,纵筋及箍筋用量减少20%以上,增加使用面积120m²,节约建设投资40万元,取得了良好的经济效益。在沈阳和泰大厦、方圆大厦等高层建筑中,核心柱与叠合柱联合应用,底部受力较大的柱采用了叠合柱,上部则采用钢管直径较小的组合柱,顶部过渡为钢筋混凝土柱,这种方法使结构设计更为合理。深圳卓越皇岗世纪中心也采用了钢管混凝土组合柱。该建筑主体高度268m,总建筑面积424008m²,底层组合柱截面尺寸1400mm×1400mm,钢管外直径为1160mm,壁厚12mm,管内外混凝土强度等级均为C70。考虑到钢筋混凝土梁与钢管混凝土叠合柱节点的施工方便性,本工程根据钢筋混凝土梁的实际配筋,开创性地在钢管上开矩形孔洞,使梁中纵向钢筋可以顺利通过(管壁开孔的截面损失率不超过50%)^[106]。目前,在全国范围内采用钢管混凝土组合柱结构已建成几十幢高层建筑,取得了较好的经济效益。相信在今后相当长的时间,钢管混凝土组合柱结构会在我国高层及超高层建筑中得到广泛应用。

2. 钢管混凝土组合柱研究现状

文献[103]通过对38根钢管混凝土组合柱在往复荷载作用下的抗震性能试验研究,考察了轴压比、体积配箍率、钢管尺寸和配箍率对组合柱抗震性能的影响。主要参数为:截面尺寸200mm×200mm,钢管 $\phi 54\text{mm} \times 2\text{mm}$ 、 $\phi 65\text{mm} \times 2\text{mm}$ 、 $\phi 104\text{mm} \times 3\text{mm}$,箍筋