



新型组合结构柱

—— 试验、理论与方法

陶忠 于清 著



科学出版社

www.sciencep.com

新型组合结构柱

——试验、理论与方法

陶 忠 于 清 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书系统地介绍了一些新型组合结构柱,如薄壁钢管混凝土、中空夹层钢管混凝土、FRP 约束钢管混凝土及 FRP 约束混凝土等组合柱的最新系列研究成果,包括试验、理论及相关构件承载力等的简化计算方法。

本书内容丰富,体系系统,理论性和实用性兼顾,可供土建类专业的科技人员、教师、研究生、高年级本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

新型组合结构柱:试验、理论与方法/陶忠,于清著. —北京:科学出版社, 2006

ISBN 7-03-016824-0

I. 新... II. ①陶...②于... III. 组合结构-柱(结构) IV. TU398

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 007007 号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年3月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2006年3月第一次印刷 印张: 23

印数: 1—3 000 字数: 480 000

定价: 55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

销售部电话 62136131 编辑部电话 62137026(BA03)

前 言

我国建设事业的不断发展对相应工程结构提出更高要求。现代工程结构重要发展方向之一是大跨、高耸、重载,要求结构能在恶劣条件下工作,且能满足施工技术的工业化要求。

组合柱的优势在于可利用不同性质的两种或多种材料进行组合,以发挥其各自的优点,达到扬长避短的目的,使得组合柱能很好地满足现代工程结构的要求,因而近年来在工业厂房、房屋建筑、桥梁和地下等结构中得到广泛应用,受到有关设计和工程技术人员的青睐,如大家所熟知的钢管混凝土、型钢混凝土和外包钢混凝土等类型的组合柱就是如此。

近年来,随着建筑业的发展和研究工作的深入,一些新型组合柱如薄壁钢管混凝土、中空夹层钢管混凝土、FRP(纤维增强复合材料)约束钢管混凝土和 FRP 约束混凝土等组合柱正越来越受到工程技术人员和有关研究者的青睐,并开始逐渐在实际工程中得到推广应用,这些新型组合柱除保持了以往传统组合柱承载力高、塑性和韧性好、施工方便和经济效果好等优点外,尚存在各自的特点,具有良好的发展应用前景。如薄壁钢管混凝土组合柱是在薄壁钢管中填充混凝土而形成的构件,其可以减少钢材用量,减轻焊接工作量,达到降低工程造价的目的。中空夹层钢管混凝土组合柱是将两层钢管同心放置,并在两层钢管之间填充混凝土而形成的构件,该类柱除了具备实心钢管混凝土的优点外,尚具有自重轻和刚度大的特点;由于其内钢管受到混凝土的保护,因此该类柱具有更好的耐火性能。FRP 约束钢管混凝土和 FRP 约束混凝土组合柱均是利用 FRP 抗拉强度高和便于施工操作等优点,对混凝土施以被动约束,从而提高构件的承载力和变形能力,在既有结构的维修加固方面具有广阔的应用前景。

由于上述新型组合柱研究和应用的历史均不长,有些如 FRP 约束钢管混凝土柱尚少见有工程应用报道,因而相应的力学性能和工作机理也未被人们系统掌握。撰写本书的目的,拟通过开展大量有针对性的试验研究,结合数值分析方法,探讨这些新型组合柱的力学性能和相应的承载力计算方法等。为实现这一目标,作者及其合作者们对人们最关心的这些新型组合柱的静力性能和往复荷载作用下的性能进行了探索和研究。

在进行新型组合柱的研究时,作者及其合作者首先有针对性地对这些新型柱进行系列的构件试验研究,以期认识其在不同参数条件下的工作特性及破坏模态,然后在试验研究的基础上,提出能够进行构件荷载-变形关系计算的理论与方法,

以期深入认识新型组合柱的工作机理。之后,为将上述研究成果进一步推进到实用化的程度,提出可供工程实践参考的相关设计建议或承载力简化计算方法等。

本书总结了本课题组有关新型组合柱的阶段性成果,对进一步深入研究新型组合柱的工作机理和设计理论只不过“抛砖引玉”而已。

新型组合柱是尚处在发展中的新生事物,其内容丰富多彩。本书在大量试验工作的基础上,对这类柱构件的一些理论与技术关键进行了探索,其中的一些论点仅代表作者当前对这些问题的认识,有待于进一步补充、完善、发展和提高。因而,对本书存在的不足乃至错误之处,谨请读者批评指正。

本书第1、2、3、4章由陶忠执笔,第5章由于清执笔。全书由陶忠定稿。

本书的研究工作主要得到国家杰出青年科学基金(No. 50425823)的资助,此外还先后获得福建省引进高层次人才科研启动费资助项目、教育部科学技术研究重点项目(205083)、福建省自然科学基金(E0410015)、福建省科技计划重点(2005H033)和重大项目等科研项目的资助,特此致谢!

作者所在课题组的其他成员如研究生黄宏、尧国皇、郑永乾、张铮、高献、王志滨、庄金平、王玲玲、王冬晔和钟远志等完成了大量的试验和计算工作,他们均对本书的完成做出了重要贡献。香港理工大学的滕锦光教授给予了很多有益的帮助。清华大学韩林海教授对本书的研究工作给予了指导和关心。在此特向他们表示由衷感谢!

主要符号

A	构件横截面面积
A_c	混凝土横截面面积
A_{ce}	中空夹层钢管混凝土的外钢管所包围的空隙面积
A_f	FRP 横截面面积
A_s	钢管或钢筋横截面面积
A_{sc}	钢管混凝土截面面积 ($A_{sc} = A_s + A_c$)
A_{sco}	中空夹层钢管混凝土截面面积 ($A_{sco} = A_{so} + A_c$)
A_{si}	中空夹层钢管混凝土内钢管截面面积
A_{so}	中空夹层钢管混凝土外钢管截面面积
B	方钢管截面外边长或矩形钢管截面短边边长
B_i	矩形中空夹层钢管混凝土内管短边边长
b_e	薄壁钢管混凝土截面有效计算宽度
B_o	矩形中空夹层钢管混凝土外管短边边长
b_s	带肋薄壁钢管混凝土加劲肋宽度
D	圆钢管外直径或矩形钢管的截面高度
D_i	矩形中空夹层钢管混凝土内管长边长
D_o	矩形中空夹层钢管混凝土外管长边长
e	轴向荷载偏心距
E	累积耗能
E_c	混凝土弹性模量
E_f	FRP 弹性模量
E_l	FRP 对混凝土的约束刚度
E_s	钢材弹性模量
f_c	混凝土轴心抗压强度
f'_c	混凝土圆柱体抗压强度
f'_{cc}	FRP 约束混凝土的极限强度
f_{ck}	混凝土轴心抗压强度标准值
f_{cu}	混凝土立方体抗压强度
f_t	FRP 极限抗拉强度

f_p	钢材比例极限
f_{scy}	钢管混凝土或中空夹层钢管混凝土轴心受压时的强度指标
f_u	钢材极限抗拉强度
f_y	钢材屈服强度
f_{yi}	中空夹层钢管混凝土内钢管钢材屈服强度
f_{yo}	中空夹层钢管混凝土外钢管钢材屈服强度
i	截面回转半径
I_c	混凝土截面抗弯惯性矩
I_s	钢管或钢筋的截面抗弯惯性矩
k_{ie}	构件初始弹性抗弯刚度
k_{se}	构件使用阶段抗弯刚度
L	构件在其弯曲平面内的计算长度
n	轴压比
N	轴向压力
N_c	混凝土承担的轴压力
N_{in}	内轴力
N_L	作用在构件上的长期轴压力
N_0	薄壁钢管混凝土名义轴压承载力或滞回试验施加在构件上的恒定轴压力
N_s	钢管承担的轴压力
N_u	构件受压强度承载力
N_{uc}	构件受压强度承载力计算值
$N_{u,cr}$	构件的轴压稳定承载力
N_{ue}	构件受压强度承载力试验值
M	弯矩
M_{in}	内弯矩
$M_{i,u}$	中空夹层钢管混凝土内管的抗弯承载力
$M_{osc,u}$	中空夹层钢管混凝土外管和夹层混凝土的组合抗弯承载力
M_u	构件抗弯承载力
M_{uc}	构件抗弯承载力计算值
M_{ue}	构件抗弯承载力试验值
M_y	屈服弯矩
p	约束力
P	作用在构件上的侧向荷载

P_y	屈服荷载
R_c	FRP 约束方、矩形混凝土的截面转角圆弧半径
t	钢管管壁厚度或长期荷载的持荷时间
t_f	FRP 的名义厚度
t_i	中空夹层钢管混凝土内钢管管壁厚度
t_o	中空夹层钢管混凝土外钢管管壁厚度
t_s	带肋薄壁钢管混凝土的加劲肋厚度
u	构件挠度
u_m	构件中截面挠度
W_{scm}	中空夹层钢管混凝土外钢管及混凝土的组合截面抗弯模量
W_{si}	中空夹层钢管混凝土的内钢管截面抗弯模量
α	含钢率, 对于钢管混凝土 $\alpha = A_s/A_c$, 对于中空夹层钢管混凝土 $\alpha = A_{so}/A_c$
α_f	FRP 约束混凝土构件截面含 FRP 率 ($\alpha_f = A_f/A_c$)
α_n	中空夹层钢管混凝土截面的名义含钢率 ($\alpha_n = A_{so}/A_{ce}$)
α_s	钢筋混凝土的纵向配筋率 ($\alpha_s = A_s/A_c$)
χ	中空夹层钢管混凝土截面空心率
$\chi(t, \tau_0)$	混凝土的龄期调整系数
Δ	轴压或偏压构件的整体压缩变形或构件的侧向位移值
Δ_y	屈服位移
Δ_u	极限位移
ε	材料应变
ε_0	受弯或偏压构件中截面形心处的应变
ε_{cc}	FRP 约束混凝土峰值应力所对应应变
ε_{co}	无约束混凝土峰值应力所对应应变
ε_{cr}	徐变应变
ε_{cu}	构件的极限应变
ε_f	FRP 极限拉应变
ε_h	环向应变
ε_{max}	受弯构件中截面拉区外边缘纤维最大应变
ε_{sh}	收缩应变
ε_v	体积应变
ε_y	钢材屈服应变
ϕ	曲率

r_m	抗弯强度承载力计算系数
φ	轴心受压构件稳定系数
$\varphi(t, \tau_0)$	混凝土徐变系数
λ	构件长细比($\lambda=L/i$)
λ_o	钢管混凝土轴心受压构件弹塑性失稳界限长细比
λ_p	钢管混凝土轴心受压构件弹性失稳界限长细比
μ	界面摩擦系数或位移延性系数
ν_c	混凝土弹性阶段泊松比
ν_s	钢材弹性阶段泊松比
ρ_{sv}	钢筋混凝土体积配箍率
σ	材料应力
τ_0	施加长期荷载时混凝土的龄期
ω_0	薄壁钢管的面外初始缺陷
ξ	约束效应系数,对于钢管混凝土 $\xi=\alpha f_y/f_{ck}$,对于中空夹层混凝土 $\xi=\alpha_n f_{yo}/f_{ck}$

目 录

前言

主要符号

第 1 章 绪言	1
1.1 结构柱的发展概况	1
1.2 传统组合柱的研究与应用	6
1.3 新型组合柱的特点	10
1.4 本书的目的、研究方法和主要内容	12
参考文献	12
第 2 章 薄壁钢管混凝土组合柱	14
2.1 引言	14
2.2 研究现状	14
2.2.1 板件稳定系数的确定	14
2.2.2 薄壁钢管混凝土力学性能研究	16
2.2.3 提高管壁稳定性的构造措施	18
2.3 试验研究	20
2.3.1 薄壁钢管混凝土	20
2.3.2 带肋薄壁钢管混凝土	25
2.4 荷载-变形关系的理论计算	39
2.4.1 纤维模型法	40
2.4.2 有限元法	49
2.5 承载力计算方法探讨	61
2.5.1 薄壁钢管混凝土的合理径(宽)厚比	61
2.5.2 带肋薄壁钢管混凝土	64
2.6 小结	69
参考文献	69
第 3 章 中空夹层钢管混凝土组合柱	73
3.1 引言	73
3.2 研究现状	73
3.3 静力性能	77
3.3.1 试验研究	77

3.3.2	荷载-变形关系的理论分析	95
3.3.3	承载力实用计算方法	109
3.3.4	矩形中空夹层钢管混凝土的力学性能	112
3.3.5	本节小结	127
3.4	压弯构件的滞回性能	128
3.4.1	试验研究	128
3.4.2	滞回性能的理论分析	157
3.4.3	滞回关系骨架线	163
3.4.4	本节小结	175
3.5	小结	175
	参考文献	176
第4章	FRP 约束钢管混凝土组合柱	178
4.1	引言	178
4.2	课题的提出	178
4.3	FRP 约束钢管混凝土轴压力学性能	180
4.3.1	试验研究	180
4.3.2	承载力简化计算初探	187
4.4	FRP 加固火灾后钢管混凝土静力性能	188
4.4.1	轴压试验	188
4.4.2	纯弯试验	192
4.4.3	偏压试验	196
4.5	FRP 加固火灾后钢管混凝土压弯构件的滞回性能	201
4.5.1	试验概况	201
4.5.2	试验现象	203
4.5.3	试验结果与分析	205
4.6	小结	221
	参考文献	222
第5章	FRP 约束混凝土组合柱	224
5.1	引言	224
5.2	研究现状及其分析	224
5.2.1	研究背景和意义	224
5.2.2	FRP 在土木工程中的应用概况	226
5.2.3	FRP 约束混凝土柱研究现状	228
5.3	静力性能	246
5.3.1	试验研究	246

5.3.2	荷载-变形关系的数值计算	273
5.3.3	本节小结	297
5.4	长期荷载作用下构件力学性能	297
5.4.1	试验研究	297
5.4.2	长期荷载作用下轴压构件的变形计算	303
5.4.3	考虑长期荷载作用影响时构件承载力的计算	309
5.4.4	本节小结	316
5.5	压弯构件的滞回性能	317
5.5.1	试验研究	317
5.5.2	滞回性能的理论分析	335
5.5.3	参数分析与滞回模型探讨	341
5.5.4	本节小结	351
5.6	小结	352
	参考文献	352

第1章 绪 言

1.1 结构柱的发展概况

建筑结构随人类的出现而诞生,并随人类社会的进步而发展。任何结构都是由各种材料所组成,早期结构发展和演变的主要推动力之一即来自于材料的发展和变革。

上古时代,人类在野外穴居或巢居,如旧石器时代的北京猿人(约 60 万年前)即住在天然岩洞里(丁大钧,蒋永生,1989)。中石器时代(公元前 8000~前 6000 年)地穴建筑开始出现。大约在新石器时代,原始人开始使用简单的木、石、骨制工具,伐木采石,模仿天然掩蔽物建造居住场所。我国黄河流域的仰韶文化遗址(约公元前 5000~前 3000 年)和西安的半坡村遗址(约公元前 4800~前 3600 年)均发现了供居住用的浅穴和直径为 5~6m 的圆形房屋(白丽华,王俊安,2002)。其中半坡村遗址中发现的木骨泥墙,可以看作是最早木构架建筑的雏形。

早期的建筑结构主要采用天然或经简单加工的材料,如泥土、木和石等建成,并发展出晒干的土坯和烧制砖。此阶段的结构柱主要采用木柱、石柱和砖柱等。

我国古代房屋建筑主要采用木柱承重的木结构体系(白丽华,王俊安,2002;熊峰等,2002)。由于木结构极易毁于战火和虫蛀等,我国古代保存完整的木结构建筑相对不多。公元 1420 年建成的北京故宫,历经明清两代,是世界上现存最大、最完整的古代木结构宫殿建筑群。木柱是木结构建筑的主要承重构件,图 1.1 所示为故宫太和殿内的蟠龙木柱。

欧洲古代的房屋建筑则多采用砖、石柱承重,屋盖由早期的一般拱券发展成穹顶,具有较大的跨越尺度和覆盖空间。图 1.2 所示为始建于公元前 447 年的希腊雅典



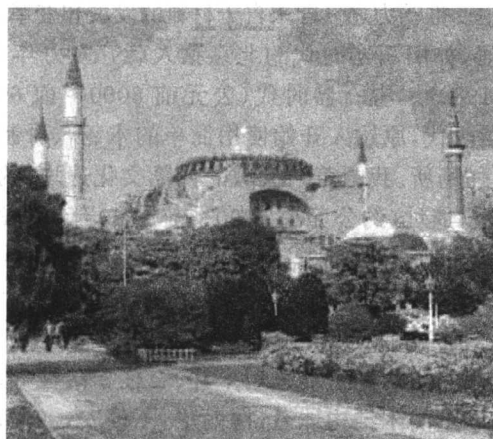
图 1.1 故宫太和殿内的蟠龙木柱



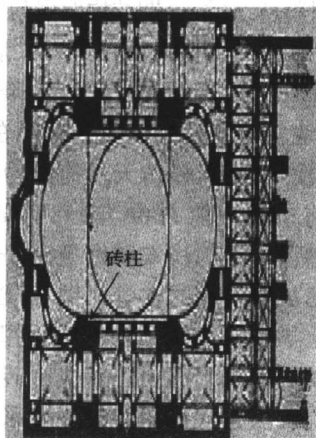
图 1.2 雅典帕提农神庙的石柱

典卫城的帕提农神庙,其主体建筑为长方形的白色大理石殿宇,四周为柱廊,共包括 46 根高 10m、直径为 2m 的大理石柱,其比例匀称、庄严和谐。

我国古代自殷商始(公元前 1388~前 1122 年)就出现晒干的土坯,战国时期的墓中就出现了烧制的大尺寸空心砖。在欧洲,大约八千年前已开始采用土坯,在建筑中采用烧制砖约有三千年的历史。建于公元 532~537 年间的土耳其伊斯坦布尔的索菲亚大教堂采用的砖砌穹顶直径达 30 余米,支承在巨大的巨型砖柱上,砖柱截面尺寸约为 $7\text{m} \times 10\text{m}$,柱间采用大跨度的砖拱代替梁,为典型的砖结构房屋(熊峰等,2002)。图 1.3(a,b)所示分别为索菲亚大教堂的外景及其平面图。



(a) 外景



(b) 平面图

图 1.3 采用砖柱的土耳其索菲亚大教堂

从 17 世纪中叶到 20 世纪中叶,此阶段为近代土木工程的大发展时期。在这一阶段,随着材料、施工技术和力学理论的发展,土木工程产生了质的飞跃。一方面,砖、瓦、木、石等建筑材料得到日益广泛的使用;另一方面,混凝土、钢材、钢筋混凝土以及早期的预应力混凝土得到发展;施工技术水平不断提高,建造规模日益扩大,建造速度大大加快。在这一发展时期,铁(钢)柱和钢筋混凝土柱在建筑结构中相继被采用,组合柱也处于萌芽阶段。

欧洲从 1720 年开始就大规模生产生铁,1784 年已能生产熟铁。到 18 世纪末,英国棉纺厂开始用铁柱、铁梁代替原来的木柱、木梁,以获得更大的生产开间和楼面承载力。世界上第一个铁柱建筑(1772 年)、第一个铁柱多高层建筑(1793 年)及第一个完整的铁框架结构建筑(1797 年)均建在英国(李国强,2004)。1856 年转炉炼钢获得了成功,钢产量开始大幅增加,为钢结构的发展打下了充分的物质基础。1872 年建于巴黎附近的 Menier 巧克力厂被认为是欧洲大陆上的第一个多层钢框架建筑。铁柱结构在 19 世纪初引入美国,到 19 世纪末,随着美国都市化进程的加

快,多高层钢铁建筑在美国得以迅速发展。1885 年在美国芝加哥建成的 Home Insurance 大楼被认为是世界上第一座高层钢结构建筑(图 1.4),标志着现代高层建筑结构的诞生。该建筑为 10 层、55m 高,采用了钢梁铁柱框架结构,外承重墙仍为砖墙,该大楼于 1931 年被拆掉。1889 年法国巴黎建成了 300m 高的埃菲尔铁塔。1931 年美国建造了著名的帝国大厦,102 层,381m 高,为全钢结构,它保持世界最高建筑的纪录长达 40 年之久。

这一时期也是钢筋混凝土从诞生到大发展的时期(丁大钧,2000)。1824 年英国人 Joseph Aspdin 发明了波特兰水泥。1850 年法国 Jean-Louis Lambot 制造了第一艘钢筋混凝土船。1854 年英国 William Wilkinson 获得了钢筋混凝土楼板的专利。7 年后法国 Francois Coignet 著文阐述了这种新建筑的原理。1861 年巴黎花匠 Joseph Monier 用水泥砂浆制作花盆,在花盆内加设钢筋网以提高强度,1867 年他获得了制造这种花盆的专利,后又获得制造其他钢筋混凝土梁、板等的专利权。此后钢筋混凝土的应用获得迅速推广。

早期钢筋混凝土结构主要用于建造小型楼板、梁、拱等构件,随着预应力技术的进步,开始用钢筋混凝土建造大空间结构,逐步使钢筋混凝土应用于土木工程各领域。至 20 世纪初,钢筋混凝土已广泛地用在房屋、桥梁、地下工程及水工等结构中,使工程结构不断大型化。1903 年美国在辛辛那提建造了 16 层、65m 高的 Ingalls 大楼(图 1.5),是世界上第一幢钢筋混凝土框架的高层建筑(赵西安,1998)。该大楼底部 10 层柱的截面尺寸为 760mm $\times$ 860mm,上部柱截面变为 300mm $\times$ 300mm 的方柱。目前已具有百年历史的 Ingalls 大楼仍在正常使用中。



图 1.4 美国 Home Insurance 大楼
(引自 www.pbs.org)



图 1.5 美国 Ingalls 大楼
(引自 www.emporis.com)

在钢结构和钢筋混凝土结构相继出现以后,钢柱和钢筋混凝土柱尤其是钢筋混凝土柱逐渐成为建筑结构柱的主导。砖柱在低层砌体结构中还有所采用,木柱和石柱则已较少应用了。

虽然钢和混凝土在近代土木工程中被广泛应用,但通过工程实践,人们认识到这些材料存在着各自不同的优缺点,有其相应的适用范围。就钢材而言,和其他材料相比具有如下特点:

1) 强度高,重量轻。钢材强度高,适于建造大跨、承受重载的结构。钢材虽然密度大,但强度与密度的比值要大于钢筋混凝土和木材,因而做成的结构却比较轻,可以减轻基础负担,降低地基基础的造价,还方便运输和吊装。但由于强度高,钢构件通常截面小而壁薄,在受压时容易发生失稳,强度难以得到充分利用。

2) 塑性和韧性好。钢材材质均匀,具有良好的塑性和韧性,被认为是较理想的全向同性弹塑性材料,具有较好的抗震性能。

3) 制作简便,施工工期短。钢结构构件一般是在金属结构加工厂制作,由于所用材料大都为型材,且采用机械化施工,因而加工迅速、质量容易保证。由于采用工厂制造、工地安装的施工方法,因而能有效地缩短施工工期。

4) 耐腐蚀性差。钢材容易锈蚀,因而对其必须加以防护,且需要长期维护。对于处于较强腐蚀性环境下的建筑其应用就会受到限制。随着耐候钢和高性能涂料的发展,钢材耐腐蚀性差的问题有望得到解决。

5) 耐热但不耐火。钢材受热,当温度在 200°C 以内时其主要性能如屈服点和弹性模量下降不多。但温度超过 200°C 后,材质变化较大,不仅强度总趋势逐步降低,还有兰脆和徐变现象。对于普通钢材,达到 600°C 时,钢材进入塑性状态已基本不能承载,因而对可能经受高温影响的钢材必须采取适当的保护措施。

6) 钢材价格相对较贵。

混凝土和其他材料相比具有如下特点:

1) 其占较大比例的砂、石材料,材料供应充分,便于就地取材,因而经济性良好,但自重较大。另外,还可有效利用矿渣、粉煤灰等工业废料。

2) 可模性好,结构造型灵活,可根据需要使用浇筑成各种形状和尺寸的结构。

3) 一次或分批浇筑而成的结构均具有较好的整体性。

4) 耐久性和耐火性良好,维护费用低。

5) 需进行较长时间的养护,影响施工工期,同时浇筑时需要进行支模。

6) 抗拉强度要大大低于其抗压强度,容易在荷载、温度等作用下产生开裂。

由上述分析可见,将钢和混凝土进行不同形式的组合,就有可能达到协同互补、扬长避短的目的。前述钢筋混凝土即为钢筋和混凝土的组合,其可发挥钢筋适于抗拉而混凝土适于抗压的特点,已成为一种独立而成熟的结构形式。此外,在近代土木工程发展过程中,通过对工程实践的不断摸索和总结,工程技术人员先后在实际工程中探索性地应用了钢管混凝土、型钢混凝土、压型钢板与混凝土组合板等

组合构件形式,如在钢管内填充混凝土以防止锈蚀;在钢柱外包混凝土以达到防火和防护的目的等。尽管开始的时候人们并没有意识到要利用两种材料的组合作用,但却无意中开创了组合结构的工程应用历史,先后出现了钢管混凝土柱、型钢混凝土柱和外包钢混凝土柱等不同形式的组合柱(周起敬等,1991;赵鸿铁,2001;蔡绍怀,2003;钟善桐,2003;韩林海,2004;韩林海,杨有福,2004)。

组合柱是指由两种或两种以上不同性质的结构材料组合成整体而共同工作的柱构件。组合柱的优势在于可利用不同性质的材料,以发挥各自的特点,达到扬长避短的目的。上述钢管混凝土柱、型钢混凝土柱和外包钢混凝土柱,由于均已有较长的研究和应用历史,本文将它们统一称之为传统组合柱。这些组合柱能够发展和应用的关键在于其能够发挥不同材料之间的组合作用。以钢管混凝土为例,在受力过程中,钢管可对混凝土产生约束作用,使混凝土处于复杂受力状态下,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,从而保证其材料性能的充分发挥。此外,在钢管混凝土的施工过程中,钢管还可以作为浇筑核心混凝土的模板,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的钢管混凝土,不仅可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柱的优势之所在(韩林海,2004)。

第一次世界大战以后,土木工程的发展进入现代阶段(熊峰等,2002)。虽然新型结构材料出现不多,但随着结构理论和施工技术的发展,工程越来越大型化,并且自重明显减轻,材料耗费不断下降,经济效益显著提高。在材料发展方面,传统结构材料呈现高性能化的发展趋势。就混凝土而言,其发展趋势是轻质、高强、高耐久性和良好的施工性能等;就钢材而言,其发展趋势是高强、耐候、高可焊性、高韧性和高抗疲劳性能等。同时新型的结构材料——纤维增强复合材料(FRP)开始进入人们的视野。在结构发展方面,其不断向大跨、高耸、重载方向发展。空间结构体系开始代替平面体系,网架、网壳、悬索、薄壳结构和膜结构成为大跨结构的发展方向。高层结构出现了许多新的结构形式,如巨型框架和悬挂结构等,使结构本身的自重减轻,空间布置更加灵活。由于技术的不断进步和对结构要求的不断提高,组合结构固有优点使其能很好地适应这方面的要求,从而为其发展提供了良好的契机。自20世纪初以来,传统组合柱开始在单层和多层工业厂房、设备构架、各种支架和栈桥、地铁站台、送变电杆塔、空间结构、高层和超高层建筑以及桥梁结构中得到了大力推广。如目前世界最高的高层建筑——台北国际金融中心大厦即采用了钢管混凝土组合柱,谱写了组合柱应用历史的新篇章。

2003年建成的台北国际金融中心大厦,其建筑高度达508m,地下5层,地上101层,也被称为台北101大厦(韩林海,2004;Sheu等,2004)。该大厦中间采用了方钢管混凝土柱,周边采用了矩形钢管混凝土柱,柱最大截面尺寸为2400mm×3000mm,内部焊接了2~3道纵向加劲肋,并在柱核心处配置钢筋以增加结构的