

高层钢—混凝土混合结构 抗震设计与评价

田淑明 编著

中国建筑工业出版社

高层钢-混凝土混合结构 抗震设计与评价

田淑明 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高层钢-混凝土混合结构抗震设计与评价/田淑明编著.

北京: 中国建筑工业出版社, 2016.10

ISBN 978-7-112-19710-1

I. ①高… II. ①田… III. ①高层建筑-钢结构-混凝土结构-抗震设计 IV. ①TU973.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 198945 号

本书共分为 10 章。第 1 章为绪言, 介绍了钢-混凝土混合结构的特点及国内外发展概况, 提出了当前设计中存在的问题。第 2 章介绍了在高层混合结构设计之初基本的设计输入条件。针对前两章提出的问题, 第 3 章提出了结构整体破坏评价方法, 建立了适用于各种地震水平的地震反应分析模型, 第 4 章给出了适用于我国规范的抗震安全评价方法及流程。第 5 章~第 10 章具体解决问题, 给出意见或建议, 包括合理刚度评价、位移限值研究、外框内力调整方法探讨、构件设计、地基基础设计及经济性分析等内容。

本书可供从事钢-混凝土混合结构设计和科研的工程技术人员使用, 也可供高等院校相关专业的教师及研究生参考。

责任编辑: 王 梅 李天虹

责任设计: 李志立

责任校对: 王宇枢 党 蕾

高层钢-混凝土混合结构抗震设计与评价

田淑明 编著

*

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

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京市密东印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 19¼ 字数: 477 千字

2016 年 12 月第一版 2016 年 12 月第一次印刷

定价: 50.00 元

ISBN 978-7-112-19710-1

(29279)

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-混凝土混合结构在我国高层和超高层结构中得到广泛应用,现已成为高层或超高层建筑可供选择的结构形式之一。钢-混凝土混合结构始于国外,兴于我国,由于其结合了钢和混凝土两种材料的优点,为解决实际工程中存在的问题提供了一种思路和方法,使其在理论和试验研究、工程实践、规范标准及计算模拟等诸多方面成为业内的研究热点。

为满足新时期建筑发展的各种需求,混合结构潜移默化地发生着变化,这种变化涵盖了材料、构件、楼层以及结构体系等各个层面,在此过程中,混合结构的形式和内涵得到丰富和发展,同时也给结构工程师提出了方方面面的问题,既有认识已不能满足发展的需求。如在设计依据方面,存在不同的规范对同一问题的规定不同甚至相互矛盾的现象;在结构安全与破损评价方面,钢-混凝土混合结构虽然经过了理论和试验研究并付诸工程实践,但是真正的震害经验有限,在强地震动下结构能否经受住考验,结构的抗倒塌能力、震后破损规律及修复可能性的判断和预测均有一定的难度和不确定性;在二道防线设计方面,存在不同标准对框架部分内力的调整方法和调整量不同、核心筒内力未调整、弹塑性阶段的合理刚度匹配关系、外框架类型与调整方法间的关系、内力重分配发生时强度调整量与刚度退化量间的关系尚不明确等问题,均需要进一步的研究和探讨;在整体刚度与承载力设计方面,鉴于我国对刚度控制较为严格,结构刚度的增大会使地震作用加大,进而造成承载力设计困难,结构体系经济性变差,如何合理选择位移指标和限值、合理选择加强层刚度等问题,还有进一步优化的空间;在构件设计方面,如钢管混凝土柱、钢板混凝土剪力墙等组合构件的设计方法尚待补充和完善;在经济性方面,如何选择经济合理的结构方案是一个值得持续探讨的课题。

基于作者在混合结构方面十多年的设计和研究,对上述一些问题进行了思考和提炼,并在实际工程中尝试着去解决,有些问题得到了较好的解决,有些问题由于作者能力和水平所限,只能做一些总结和梳理,以引起大家的思考和讨论,为日后这些问题的解决起到铺垫作用。本书共分为10章,每一章先针对某一问题的研究和应用现状进行介绍,然后根据理论分析和工程实践开展讨论。第1章绪言介绍了钢-混凝土混合结构的特点,对国外的应用概况、国内应用演变情况以及研究现状做了简要概括,结合近些年国内混合结构的应用和发展提出了当前设计中存在的诸多待解决的问题,这些问题正是后续章节讨论的重点。第2章介绍了在高层混合结构设计之初基本的输入条件,重点讨论了设计依据、材料、荷载作用及效应和设计计算分析等几方面,对有显著影响的因素如岩土勘察、地震安评、风洞试验、计算参数、不规则性等进行了重点阐述。第3章介绍了当前的结构破损评价方法,重点讨论了适用于结构整体破损评价的刚度比法以及采用此方法所必需的静态化处理方法和评价标准,建立了适用于各种地震水平的地震反应分析模型,通过实际工程算例验证上述方法和模型的可行性。第4章对开展混合结构抗震安全评价的必要性和基本流程进行了介绍,与我国规范进行了较好的衔接,通过一个钢筋混凝土结构算例验证了方法

的可行性,并将此方法运用于混合结构中,对混合结构的安全性能特点进行了讨论。第5章对带加强层和无加强层的框架-核心筒混合结构进行了刚度解析,给出了刚度比参数的合理范围,根据受力特点对各组成部分进行了划分,统一了带加强层和无加强层两种混合结构的刚度比参数,根据刚度特征分区对不同的混合结构体系进行了划分,通过两个实际工程的刚度优化设计验证了上述合理刚度评价方法。第6章对各国标准中位移限值的规定进行了总结和比较,重点讨论了位移限值与高宽比、结构变形特点与位移指标间的关系,通过理论和算例分析给出了混合结构适用的位移指标及限值。第7章总结了我国及美国规范外框架内力的调整方法,对不同的调整方法从适用范围、调整对象、双重体系划分、强度与刚度关系、内力重分配等多个方面进行了对比,通过实际工程算例研究了不同方法对设计的影响,并给出了设计建议。第8章围绕相关设计规范对构件设计的规定,讨论内容包括各设计标准的适用范围、钢管材料选型、钢管混凝土柱的设计计算、型钢(钢板)混凝土剪力墙等几个方面。第9章讨论了岩土勘察与结构设计间的关系,对天然地基、筏板基础、桩基础中常遇问题进行了说明,对土-结构相互作用、基于性能的抗震设计中存在的问题进行了总结。第10章分析了影响混合结构经济性的主要因素,以一实际案例分析了混合结构方案选型与经济性的关系,总结了国内一些工程实例的材料用量,分析了相关的规律,给出了结构选型建议。

本书涵盖了作者在求学和工作中的点滴积累,离不开老师、领导、同事及同行的关心和指导。特别感谢导师聂建国教授在理论研究方面给予的引领和指导,感谢CANNY程序的开发者李康宁教授提供的软件技术支持,感谢中冶京诚工程技术有限公司王立军教授、张惠江教授、尚志海教授、李绪华教授、余海群教授在诸多实际工程设计中给予的指导和帮助,感谢中旭建筑设计有限责任公司的唐杰、李忠盛、吴举等领导和同事在项目上提供的支持和配合,感谢泰禾集团设计研发部的傅宁、曾少卿、王元元、杨彬、张瑞军等领导和同事在工作上给予的关心和帮助,感谢约翰马丁工程顾问(北京)有限公司的罗超英总经理、浙江大学谢霁明教授、北京中地大工程勘察设计院贺学海博士、北京赛斯米克科技发展中心罗桂纯高工提供的技术支持。本书引用了大量国内外参考文献、已有应用及研究成果和工程案例,这是本书各章节的有力支撑,对相关作者及参与人员表示感谢。感谢中国建筑工业出版社建筑结构图书中心的王梅主任、李天虹编辑为本书的出版提出了很多好的建议并做了大量工作。在此,谨向所有给予过作者无私帮助和默默支持的人表示由衷的感谢。

需要指出的是,高层钢-混凝土混合结构设计领域十分宽广,工程实践的发展更是日新月异,远非本书内容所能涵盖,也非作者一人之力能及,作者仅在自己较为熟悉的个别领域进行了总结和探讨,旨在与各位读者交流和讨论,作者邮箱为1581916671@qq.com。

鉴于作者水平和学识有限,书中必有欠缺及不足之处,有些观点也是一家之言,敬请各位专家、同行和读者批评指正,一起探索混合结构设计的未知领域。

田淑明

2016年7月

目 录

第1章 绪言	1
1.1 钢-混凝土混合结构	1
1.2 混合结构应用和发展现状	2
1.2.1 国外应用概况	2
1.2.2 国内应用及演变	2
1.2.3 研究现状	3
1.3 混合结构的新发展及问题	4
1.3.1 设计依据	4
1.3.2 结构安全及破损评价	6
1.3.3 二道防线设计	7
1.3.4 整体刚度与强度设计	8
1.3.5 高强材料及新型构件应用	9
1.3.6 地基基础设计	10
1.3.7 技术经济性	11
1.4 小结	11
参考文献	11
第2章 基本设计输入条件	17
2.1 设计依据	17
2.1.1 规范及标准	17
2.1.2 建设方要求	18
2.1.3 地质灾害危险性评估	18
2.1.4 岩土勘察	19
2.1.5 地震安全性评价	20
2.1.6 风洞试验	24
2.1.7 结构试验	29
2.1.8 其他专业条件	29
2.2 材料选择	29
2.3 荷载、作用及效应	30
2.3.1 恒载和活载	30
2.3.2 地震作用	30
2.3.3 风荷载	31
2.3.4 地下水作用	32
2.3.5 其他荷载	34
2.4 计算分析	35
2.4.1 计算参数	35

2.4.2 构件刚度	41
2.5 概念设计	44
2.5.1 不规则性	44
2.5.2 性能化设计	45
2.6 小结	49
参考文献	49
第3章 地震破损评价方法	51
3.1 引言	51
3.2 破损评价方法	51
3.2.1 拟采用方法	51
3.2.2 静态化处理方法	52
3.2.3 评价标准	55
3.3 地震反应分析模型	56
3.3.1 单元破坏准则	57
3.3.2 滞回模型	58
3.3.3 几何非线性	61
3.3.4 阻尼模型	61
3.3.5 框架单元	62
3.3.6 剪力墙单元	66
3.3.7 楼盖模拟	70
3.3.8 分析模型校验	73
3.4 实例验证及应用	78
3.4.1 结构概况	78
3.4.2 分析假定	81
3.4.3 地震动输入	81
3.4.4 地震反应模拟	81
3.4.5 破损评价及验证	83
3.5 小结	83
参考文献	84
第4章 抗震安全评价	87
4.1 引言	87
4.2 抗震安全评价基本程序	87
4.3 地震危险性分析	88
4.4 地震反应分析	89
4.4.1 地震反应分析模型	89
4.4.2 地震波样本选取与输入	89
4.4.3 地震动强度度量	91
4.5 安全性预测	92
4.5.1 累积失效分布函数	92
4.5.2 年平均失效频率	93
4.6 方法验证	93

4.6.1 结构概况	93
4.6.2 地震危险性分析	95
4.6.3 静力弹塑性分析	95
4.6.4 地震动强度指标	95
4.6.5 位移分析	96
4.6.6 安全性能预测	97
4.7 混合结构抗震安全评价	99
4.7.1 算例选取	99
4.7.2 地震危险性分析	101
4.7.3 位移分析	101
4.7.4 安全性能预测	102
4.8 小结	104
参考文献	105
第5章 合理刚度评价	106
5.1 引言	106
5.2 带加强层框架-核心筒结构刚度解析	107
5.2.1 分析假定	107
5.2.2 刚度与效应	108
5.2.3 刚度比参数	109
5.2.4 刚度比参数与位移限值	110
5.2.5 合理刚度比参数取值范围	112
5.3 无加强层框架-核心筒结构抗侧刚度解析	112
5.3.1 理论推导	112
5.3.2 连接方式对抗侧刚度的影响	114
5.3.3 连接方式对周期的影响	115
5.3.4 反应谱分析验证	115
5.3.5 组合楼盖对抗侧刚度的影响	116
5.4 统一刚度比参数及刚度特征分区	118
5.4.1 类筒体和类框架	118
5.4.2 类筒体刚度比参数	118
5.4.3 类框架刚度比参数	119
5.4.4 刚度特征分区	120
5.5 实际工程应用一	121
5.5.1 工程概况	121
5.5.2 弹塑性分析校核	123
5.5.3 利用刚度比参数调整优化	130
5.5.4 振动台试验验证	133
5.6 实际工程应用二	137
5.6.1 工程概况	137
5.6.2 调整优化	138
5.6.3 调整前后结果对比	139
5.7 小结	140

参考文献	140
第 6 章 位移限值研究	143
6.1 引言	143
6.2 各标准位移限值规定	143
6.2.1 国外各标准规定	143
6.2.2 国内各标准规定	146
6.2.3 各标准对比总结	150
6.3 位移限值与高宽比的相关性	150
6.3.1 结构剪切变形与高宽比	151
6.3.2 顶点位移限值与高宽比	151
6.3.3 刚性楼盖假定与高宽比	151
6.4 位移指标的选取	152
6.4.1 可用的位移指标	152
6.4.2 不同结构的变形特点	153
6.4.3 位移指标的选取	154
6.4.4 弹塑性位移角与弹性位移角关系	155
6.5 框架-核心筒混合结构的位移限值建议	158
6.5.1 带加强层钢框架-混凝土核心筒结构	158
6.5.2 无加强层钢框架-混凝土核心筒结构	161
6.5.3 钢框架-混凝土核心筒结构位移限值建议	166
6.5.4 钢管(型钢)混凝土框架-混凝土核心筒结构位移限值建议	166
6.6 小结	167
参考文献	167
第 7 章 外框内力调整方法探讨	170
7.1 引言	170
7.2 国内相关标准规定	170
7.2.1 GB 50011—2010	170
7.2.2 JGJ 3—2010	170
7.2.3 CECS 159: 2004	171
7.2.4 CECS 230: 2008	171
7.2.5 CECS 28: 2012	171
7.2.6 CECS 254: 2012	172
7.2.7 DG/TJ 08—015—2004	172
7.2.8 超限工程抗震审查技术要点	172
7.3 美国相关标准	172
7.3.1 UBC-97	172
7.3.2 IBC2000 (IBC2003)	173
7.3.3 ASCE7-05 (IBC2006, IBC2009, IBC2012)	173
7.3.4 条文解读	173
7.4 调整方法对比	173
7.4.1 两种方法及适用条件	173

7.4.2 内力调整对象	174
7.4.3 调整方法与双重体系	174
7.4.4 调整方法与框架部分刚度	175
7.4.5 多道设防与内力重分配	175
7.5 工程实例研究	176
7.5.1 工程概况	176
7.5.2 调整系数对比	176
7.5.3 框架柱轴力调整	177
7.5.4 框架部分倾覆力矩比	178
7.5.5 框架部分的刚度比例	179
7.5.6 弹塑性分析	179
7.5.7 振动台试验	180
7.6 小结	180
参考文献	181
第8章 构件设计	183
8.1 引言	183
8.2 各标准适用范围	184
8.3 钢管选型	185
8.4 钢管混凝土柱	186
8.4.1 圆钢管混凝土柱构造要求	186
8.4.2 矩形钢管混凝土柱构造要求	192
8.4.3 圆钢管混凝土柱承载力	193
8.4.4 矩形钢管混凝土柱承载力	202
8.5 钢板(型钢)混凝土剪力墙	206
8.5.1 承载力验算	206
8.5.2 中震验算	207
8.5.3 连接件的计算和构造	209
8.6 小结	217
8.7 附录:圆钢管混凝土截面塑性应力分布算法	217
参考文献	218
第9章 地基基础设计	220
9.1 引言	220
9.2 岩土勘察与结构设计	221
9.2.1 勘察与设计的先与后	221
9.2.2 岩土勘察所需结构资料	222
9.2.3 结构设计所需岩土资料	223
9.3 天然地基	223
9.3.1 承载力计算	224
9.3.2 变形估算	231
9.4 筏形基础	237
9.4.1 偏心距及抗倾覆稳定性	237

9.4.2 整体稳定性	239
9.4.3 承载力计算	239
9.4.4 抗浮设计	242
9.5 桩基础	245
9.5.1 承载力计算	245
9.5.2 变形控制	251
9.6 地基-结构相互作用	253
9.6.1 标准规定及文献研究	253
9.6.2 文献总结	257
9.6.3 设计应用	258
9.7 抗震性能化设计	261
9.7.1 基础的性能化设计	261
9.7.2 地基的性能化设计	262
9.8 小结	262
参考文献	263
第10章 经济性分析	266
10.1 引言	266
10.2 经济性影响因素	267
10.2.1 地理位置	267
10.2.2 设计标准及依据	267
10.2.3 建筑形体	267
10.2.4 上部结构形式	270
10.2.5 地下室结构	270
10.2.6 地基基础选型及施工	273
10.2.7 材料选择	279
10.2.8 细部设计	281
10.2.9 施工周期	282
10.2.10 介入时间	282
10.2.11 工程造价指标	282
10.3 结构方案与经济性案例分析	283
10.3.1 工程概况	283
10.3.2 结构方案	284
10.3.3 技术经济比较	288
10.4 部分工程经济性统计分析	290
10.5 基于经济性的结构选型建议	293
10.6 小结	295
参考文献	295

第 1 章 绪 言

1.1 钢-混凝土混合结构

根据结构所采用的材料,可以将结构划分为钢筋混凝土结构、钢结构、砌体结构、木结构等,每种结构材料都有自身的特点,既有优势,也会存在不足,将两种或更多的材料组合在一起,取长补短,材尽其用,是结构发展的一个重要方向。钢-混凝土组合或混合结构便是典型的代表,它将钢和混凝土组合在一起,将混凝土抗压性能和钢材的抗拉性能结合起来,使得构件或结构的承载力、刚度、稳定性及延性大幅提高,所不同的是组合结构偏向于构件层面,而混合结构偏向于体系层面,更广义一些。钢-混凝土混合结构由各种构件组合而成,如钢构件、钢筋混凝土构件、钢-混凝土组合构件等,钢-混凝土组合构件又包括钢-混凝土组合梁、钢-混凝土组合柱、钢-混凝土组合节点、钢-混凝土组合墙、钢-混凝土组合板等。目前钢-混凝土混合结构已成为高层和超高层结构设计中可供选择的结构形式之一,也发展成为一个热门的研究领域。

钢-混凝土混合结构根据受力特点可划分为框架结构、剪力墙结构、框架-剪力墙结构、筒体结构(包括框架-核心筒结构、筒中筒结构)等不同的结构形式,我国各标准中针对混合结构的规定一般是有特指或适用范围的。如《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3—2010^[1]中所规定的混合结构特指由外围钢框架或型钢混凝土、钢管混凝土框架与钢筋混凝土核心筒所组成的框架-核心筒结构以及由外围钢框筒或型钢混凝土、钢管混凝土框筒与钢筋混凝土核心筒所组成的筒中筒结构。又如《型钢混凝土组合结构技术规程》JGJ 138—2001^[2]适用于型钢混凝土组合结构,此规程所指的结构为混凝土内配置型钢(轧制或焊接成型)和钢筋的结构,分为全部结构构件采用型钢混凝土的结构和部分结构构件采用型钢混凝土的结构,两类结构用于框架结构、框架-剪力墙结构、底部大空间剪力墙结构、框架-核心筒结构、筒中筒结构等结构体系。再如《高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程》CECS 230:2008^[3]的适用范围更为广泛,适用于 10 层及 10 层以上或房屋高度超过 28m 的高层建筑钢-混凝土混合结构的设计,规程所指的钢-混凝土混合结构包括混合框架结构、双重抗侧力体系及非双重抗侧力体系,混合框架结构包括钢骨(钢管)混凝土柱-钢梁框架、钢骨混凝土柱-钢骨混凝土梁框架、钢筋混凝土柱-钢梁框架,双重抗侧力体系包括由钢框架、混合框架和钢筋混凝土核心筒(或剪力墙)、钢骨混凝土核心筒(或剪力墙)组成的框架-核心筒或框架-剪力墙结构,以及由钢框筒、混合框筒和钢筋混凝土内筒、钢骨混凝土内筒组成的筒中筒结构,上述框架-核心筒结构在一定条件下成为非双重抗侧力体系。

钢-混凝土混合结构综合了钢结构和混凝土结构两者的优势,有其自身的特点。与钢筋混凝土结构相比,其优势为结构构件尺寸小、占用建筑面积和净高小,结构自重小、降

低基础造价,施工速度快,抗震性能好。与钢结构相比,其优势为用钢量少、整体刚度好、结构防火防腐性能好。我国的工程实践证明,钢-混凝土混合结构是符合我国国情较好的高层建筑结构形式,在高层和超高层建筑中有明显的优势。

1.2 混合结构应用和发展现状

1.2.1 国外应用概况

20 世纪 70 年代国外就开始采用混合结构,最早为建于 1972 年的芝加哥 Gateway III Building,从 80 年代初到 90 年代末,美国、马来西亚、新加坡、加拿大、法国等一些国家相继建造了一批混合结构高层建筑。1994 年美国阿拉斯加地震中有三幢混合结构(Anchorage-Westward Hotel、Cordova Building 和 Hill Building)遭到破坏,鉴于这种结构体系建筑倒塌的严重现实,美国的一些设计规程曾指出,对这种体系的抗震问题没有进行过系统的研究,认为不宜用于地震区,并认为混合结构体系只能用于 150m 以下的非抗震区建筑^[4]。日本曾于 1992 年建造了两幢钢框架-混凝土核心筒的高层建筑,高度分别为 78m 和 107m,1995 年阪神地震中混合结构的震害为改进设计提供了经验,直到 1998 年才又建造了埼玉县雄狮广场高层住宅楼(55 层、高 186m),对这种体系,日本规范要求极为严格,将其列为特种结构,要经过相关部门批准后方可在工程中应用^[5,6]。

1.2.2 国内应用及演变

20 世纪 80 年代末,随着世界经济的发展和我国改革开放的深入,我国高层建筑得到飞速发展,钢材开始逐渐在建筑结构中应用,但是当时受用钢量、设计习惯、技术标准、施工工艺等方面的制约,使得钢结构并没有大面积铺开,而是走出了自己的特色,在尝试采用钢结构后,转而开始采用钢-混凝土混合结构,并得到大量应用,被认为是符合我国国情的一种结构形式^[7,8]。尤其是从 90 年代后期至今,北京、上海、广州、深圳、厦门、大连等地兴建的高楼大都采用了混合结构^[9]。

北京中国国际贸易中心一至三期是记录这一历程的典型代表,如图 1-1 所示。

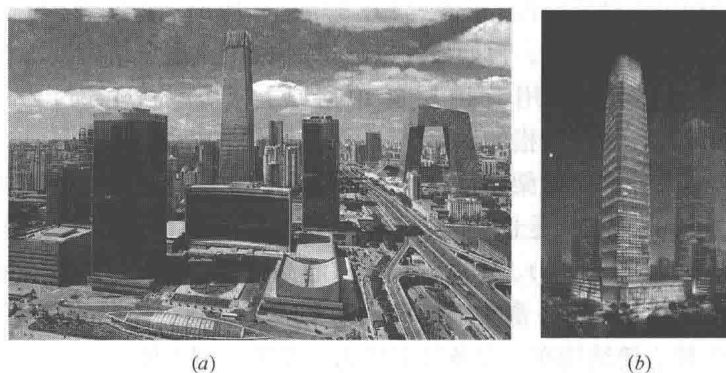


图 1-1 北京国贸

(a) 一期、二期及三期 A; (b) 三期 A 和 B

北京中国国际贸易中心一期^[10], 1989 年建成, 高 155m, 建筑面积约为 8.6 万 m², 地上 39 层, 地下 2 层, 典型楼层的层高为 3.7m, 埋深 15m。主楼采用钢结构筒中筒体系, 地下室采用钢筋混凝土结构, 地面以上 1~3 层采用型钢混凝土结构, 4 层以上采用全钢结构, 内框筒和外框筒的平面尺寸分别为 21m×21m 和 45m×45m, 房屋高宽比为 3.4, 内筒的高宽比为 7.3, 内外框筒的柱距均为 3m, 内外筒之间的钢梁跨度为 12m, 铰接于内外筒钢柱上, 各层楼板均采用以压型钢板为底模现浇钢筋混凝土组合楼板, 采用筏板基础。

北京中国国际贸易中心二期主楼^[10], 1998 年建成, 高 156m, 建筑面积 12.65 万 m², 地上 39 层, 地下 3 层, 建筑平面基本上呈方形, 仅一条对角线上的两个角改为圆弧形, 建筑平面的外轮廓尺寸为 45m×45m。结构体系为钢框架-混凝土核心筒混合结构, 周边钢框架的柱距均为 9m, 结构高宽比为 3.5, 内筒高宽比为 10。

北京中国国际贸易中心三期 A 主楼^[11], 2007 年建成, 高 330m, 建筑面积 29.7 万 m², 地上 74 层, 地下 3 层。结构体系为外框筒和核心筒组成的钢-混凝土混合结构, 外框筒由型钢混凝土柱加钢框架梁组成 (加强层设置腰桁架), 核心筒的周边为型钢混凝土柱和型钢梁及支撑, 内外筒之间设置钢伸臂桁架, 16 层以下墙体为设有钢板的剪力墙, 结构高宽比为 6.3, 核心筒高宽比为 15.9。采用桩筏基础, 底标高-22.000m, 筏板平均厚度为 4.5m, 局部最厚达 9.6m, 平面尺寸为 64.8m×63.8m, 底板下共布置 350 根 1200mm 直径梅花形布置的工程桩, 桩长为 56m。

北京中国国际贸易中心三期 B 主楼^[12], 2016 年建成, 建筑高 300m, 结构高 265.1m, 建筑面积 12.3 万 m², 塔楼平面布局为正方形, 每层的楼板宽度稍微有所不同, 周边框架柱间距在上部办公室层为 9m, 在下部酒店层为 4.5m, 到了地下部分又变回 9m。塔楼结构体系为型钢混凝土柱+钢梁框架-钢筋混凝土核心筒混合结构 (底部楼层采用型钢或钢板混凝土组合墙), 塔楼的高宽比为 6, 在第 6 层设置伸臂桁架, 布置在核心筒四个角, 核心筒墙的厚度从底部的 1400mm 变为顶部的 600mm, 对应钢骨混凝土柱的尺寸从 1000mm×1600mm 变至 600mm×600mm, 塔楼核心筒内的楼面体系由传统的钢筋混凝土梁板组成, 核心筒外的结构钢梁与压型钢板协同作用。

国贸一期、二期、三期 A、三期 B 分别在 1989 年、1998 年、2007 年和 2016 年建成, 分别采用筒中筒钢结构、钢框架-混凝土核心筒混合结构、组合抗弯框架外筒-组合支撑内框筒混合结构、型钢混凝土框架-混凝土核心筒混合结构。各期之间分别相差了 9 年, 分别处于 20 世纪 80 年代、90 年代和 21 世纪初几个年代, 非常典型地代表了我国超高层钢结构和混合结构的发展历程, 无论在技术上还是经济性上都体现了时代的特点, 尤其体现了以 JGJ 3—91、JGJ 3—2002、JGJ 3—2010 为代表的几个版本规范的编制和发展过程, 充分说明了混合结构是经过实践检验并符合我国国情的一种结构形式。

1.2.3 研究现状

高层混合结构的发展历程, 离不开对这一结构形式所进行的一系列试验研究、理论分析、数值模拟、标准制定以及大量工程实践的总结。

在试验研究方面, 国内多个单位开展了钢框架-混凝土核心筒混合结构缩尺模型的振动台试验^[13-19]及型钢混凝土框架-混凝土核心筒混合结构缩尺模型的振动台试验^[20-23]的研

究, 在一些超限工程中也开展了整体结构的振动台试验验证和研究工作^[24-26], 与此同时, 国内外学者针对混合结构中一些关键连接节点也开展了大量的研究工作^[27-39]。上述试验研究为混合结构抗震性能的深入认识和广泛应用奠定了试验基础。

在混合结构的理论分析和数值模拟方面也有长足的发展: 混合结构的整体分析模型^[6,40-48]、框架梁和框架柱分析模型^[49-52]、剪力墙或筒体分析模型^[49-54]等各种分析模型在混合结构的工程设计中得到尝试并取得了有益的成果; 各种位移控制指标及位移限值的研究和探讨^[40,49,55-62]使混合结构的位移控制更为明确和有针对性; 针对高层混合结构所适用的高宽比, 也有很多学者做了相应的研究^[6,40,63-66], 为混合结构抗震措施的采用起到了指导作用; 在混合结构各组成部分间的刚度匹配关系方面, 开展了对外框架、核心筒、加强层等各组成部分间的合理刚度构成的研究和探讨^[4,65-77], 使各组成部分对整体结构刚度的贡献程度更为明晰。

在设计标准方面, 基于试验、理论分析和工程实践, 一系列针对混合结构设计的行业标准^[1,2,79]、协会标准^[3,80-84]、地方标准^[85,86]建立起来, 使得混合结构在工程实践中的应用变得有章可循, 也为后续应用和研究工作的积累做了基础性的铺垫。

在工程实践上, 当前我国大部分高层或超高层结构都采用了钢-混凝土混合结构, 如北京国贸三期 A、上海环球金融中心、天津高银 117 大厦、广州东塔、深圳京基金融中心等。

上述研究和实践工作为推动混合结构在我国的应用发挥了重要作用, 而且更为深入的研究工作还在继续, 研究和实践交相呼应、良性互动, 正在不断地向纵深发展。

1.3 混合结构的新发展及问题

混合结构因其独特的优势成为我国高层建筑主流结构形式之一, 它在为结构工程师提供一种选择的同时, 也给结构工程师提出了方方面面的问题。并且, 为满足新时期建筑的各种需求, 混合结构也在潜移默化地发生着变化, 这种变化既涵盖了材料、构件、楼层以及结构体系等各层面, 也包括了规划、设计、施工等各阶段, 在此过程中, 混合结构的形式和内涵得到了丰富和发展。现就一些新的典型的变化、存在的问题及今后的研究方向介绍如下。

1.3.1 设计依据

高层混合结构的设计和应用离不开设计规范和标准, 这些标准有行业标准、协会标准以及地方标准等, 对混合结构的设计和施工起到了很好的指导作用, 但也出现了针对同一问题, 不同的规范有不同的说法, 不同规范解决问题的方法和建议不同, 甚至出现相互矛盾的现象。以混合结构的适用高度为例, 不同的标准中的规定就存在较大的差别, 如下所述。

《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3—2010 的 11.1.2 条对混合结构的适用高度的规定如表 1-1 所示, 表中列出了钢筋混凝土结构 A 级和 B 级的适用高度规定以便比较。

JGJ 3—2010 混合结构的适用最大高度 表 1-1

结构体系		非抗震设计	抗震设防烈度				
			6 度	7 度	8 度		9 度
					0.2g	0.3g	
框架-核心筒	钢框架-钢筋混凝土核心筒	210	200	160	120	100	70
	型钢(钢管)混凝土框架-钢筋混凝土核心筒	240	220	190	150	130	70
	钢筋混凝土框架-核心筒	(B220) (A160)	(B210) (A150)	(B180) (A130)	(B140) (A100)	(B120) (A90)	(B—) (A70)
筒中筒	钢外筒-钢筋混凝土核心筒	280	260	210	160	140	80
	型钢(钢管)混凝土外筒-钢筋混凝土核心筒	300	280	230	170	150	90
	钢筋混凝土筒中筒	(B300) (A200)	(B280) (A180)	(B230) (A150)	(B170) (A120)	(B150) (A100)	(B—) (A80)

注：A160 表示 A 级高度的钢筋混凝土结构的最大适用高度为 160m，B220 表示 B 级高度钢筋混凝土结构的最大适用高度为 220m。

《高层建筑钢-混凝土混合结构设计规程》CECS 230：2008 的 4.1.2 条规定了乙类和丙类高层建筑混合结构的最大适用高度，如表 1-2 所示。

CECS 230：2008 混合结构的适用最大高度 表 1-2

结 构 类 型		非抗震设计	抗震设防烈度			
			6	7	8	9
混合框架结构	钢梁-钢骨(钢管)混凝土柱 钢骨混凝土梁-钢骨混凝土柱	60	55	45	35	25
	钢梁-钢筋混凝土柱	50	50	40	30	—
双重抗侧力体系	钢框架-钢筋混凝土剪力墙	160	150	130	110	50
	钢框架-钢骨混凝土剪力墙	180	170	150	120	50
	混合框架-钢筋混凝土剪力墙	180	170	150	120	50
	混合框架-钢骨混凝土剪力墙	200	190	160	130	60
	钢框架-钢筋混凝土核心筒	210	200	160	120	70
	钢框架-钢骨混凝土核心筒	230	220	180	130	70
	混合框架-钢筋混凝土核心筒	240	220	190	150	70
	混合框架-钢骨混凝土核心筒	260	240	210	160	80
	钢框筒-钢筋混凝土内筒	280	260	210	160	80
	混合框筒-钢筋混凝土内筒	300	280	230	170	90
非双重抗侧力体系	钢框架-钢筋(钢管)混凝土核心筒 混合框架-钢筋(钢管)混凝土核心筒	160	120	100	—	—

《型钢混凝土组合结构技术规程》JGJ 138—2001 的 4.2.3 条规定：采用型钢混凝土组合结构时，房屋最大适用高度可比行业标准《钢筋混凝土高层建筑结构与施工规程》JGJ 3—91 所规定的房屋最大适用高度适当提高；当全部结构构件均采用型钢混凝土

结构,包括型钢混凝土框架和钢筋混凝土筒体组成的混合结构,除设防烈度为9度外,房屋最大适用高度可相应提高30%~40%。

从以上几本标准的规定可知:

(1) 钢框架-钢筋混凝土核心筒结构和型钢(钢管)混凝土框架-钢筋混凝土核心筒结构的适用高度,JGJ 3和CECS 230的规定都是相同的,其中型钢混凝土框架-钢筋混凝土核心筒结构比JGJ 138的相应规定略高一些。

(2) 针对框架-核心筒混合结构,JGJ 3考虑到外框架中采用型钢(钢管)混凝土构件后,其承载力和延性有较大改善,型钢(钢管)混凝土框架-钢筋混凝土核心筒结构的最大适用高度比A级高度钢筋混凝土框架-核心筒结构提高约44%~50%(9度区除外,下同),比B级高度钢筋混凝土框架-核心筒结构高10~20m;与此对应,由于外钢框架与钢筋混凝土核心筒相比,刚度较弱,二道防线较差,主要靠钢筋混凝土核心筒来承担地震作用,故钢框架-钢筋混凝土核心筒结构的最大适用高度相对于A级高度钢筋混凝土框架-核心筒结构的提高比例小一些,约为11%~33%,比B级高度钢筋混凝土框架-核心筒结构要低10~20m。

(3) 针对筒中筒混合结构,与上条同理,JGJ 3中型钢(钢管)混凝土外筒-钢筋混凝土核心筒结构的最大适用高度比A级高度钢筋混凝土筒中筒结构提高41%~55%,与B级高度的钢筋混凝土筒中筒结构相同;钢外筒-钢筋混凝土核心筒结构的最大适用高度比A级高度钢筋混凝土筒中筒结构提高33%~44%,比B级高度钢筋混凝土筒中筒结构低10~20m。

(4) JGJ 3和CECS 230的区别就是JGJ 3将8度区按照0.2g和0.3g进行了区分,对0.3g地区调低了20m,CECS 230对采用钢骨混凝土核心筒的结构高度提高了10~20m,但未如JGJ 3一样根据外框筒的类型对筒中筒结构进行适用高度的划分,从刚度匹配角度来讲,混合框筒-钢筋(钢骨)混凝土内筒结构的最大适用高度可比钢框筒-钢筋(钢骨)混凝土核心筒结构提高一些。

由以上规定及分析可知,不同的设计标准中,对混合结构的最大适用高度规定不同,有各自的适用范围,各个标准中也都有可借鉴的地方,其他规定也与此类似,在具体实践中引用这些规定时,应具体问题具体分析,比较斟酌。本书的后续章节,在谈及某一问题时,也会对不同标准中的相关设计规定进行总结和梳理,供参考使用。

1.3.2 结构安全及破损评价

在我国,钢-混凝土混合结构虽然经过了理论和试验研究并付诸工程实践,但是真正的震害经验有限,在强地震动下结构能否经受住考验,结构的抗倒塌能力、震后破损规律及修复可能性的判断和预测均有一定的难度和不确定性。按照《建筑抗震设计规范》GB 5011—2010的1.0.1条和《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ 3—2010的1.0.3条规定,可采用抗震性能化设计方法,但是性能化设计在我国刚刚起步并在逐步的发展中,尚有许多问题需要进一步的研究和完善,如地震灾害危险性分析、结构分析(包括非线性动力分析、倒塌模拟、不确定分析、考虑地基-基础-上部结构的相互作用等)、损伤分析(包括构件或组成部分不同破损状态下对应的破损概率)、损失分析(修复费用评估)等,目前将这一流程应用于混合结构的抗震安全评价很少见诸文献。