

傅传国 娄宇 著

预应力型钢混凝土结构 试验研究及工程应用



科学出版社

www.sciencep.com

TU378/21

2007

预应力型钢混凝土 结构试验研究及工程应用

傅传国 娄 宇 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

针对作者近年来在预应力型钢混凝土新型组合结构方面的研究工作,本书重点介绍了预应力型钢混凝土受弯构件、单层单跨框架和大跨托柱叠层转换结构等几类模型的试验研究成果,提出了关于预应力型钢混凝土构件和结构的分析计算理论、设计方法和构造措施等相关建议。书中试验研究内容翔实,相应的设计计算理论都附有计算实例,方便读者阅读和参考。

本书可供土木结构工程设计人员及高等院校土木工程类专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

预应力型钢混凝土结构试验研究及工程应用 / 傅传国, 娄宇著.
—北京: 科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-019577-7

I. 预… II. ①傅…②娄… III. 预应力结构: 钢筋混凝土结构—研究 IV. TU378

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 122508 号

责任编辑: 童安齐 / 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>

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 9 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2007 年 9 月第一次印刷 印张: 16 1/4

印数: 1—2 500 字数: 350 000

定价: 40.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈新欣〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

前 言

随着我国国民经济的快速发展,对建筑功能的要求越来越高。建筑设计正朝着体型复杂、功能多样的综合性方向发展,相应的结构形式进而变得复杂多样;大跨度、重载结构的不断涌现,对结构体系提出了新的更高的要求。

预应力混凝土技术堪称是对混凝土结构的一次技术革命。当今的预应力混凝土是用高强度钢材和较高强度的混凝土经先进的生产工艺制作的、用现代设计概念和方法设计的高效预应力混凝土。预应力可以有效地改善结构的使用阶段性能(如控制裂缝开展和消除结构挠度等),提高受剪承载力和疲劳强度,改善卸载后的恢复力性能,充分地利用高强度的钢材,有效地调整结构的内力等。当今,预应力技术在传统应用领域的基础上,已迅速扩大到居住建筑、大跨与重载结构、大空间公共建筑、高层建筑、高耸结构、地下结构、海洋结构及道路桥梁结构等领域。预应力的概念和技术已成为新型结构体系创新的重要手段之一。

型钢混凝土结构是在混凝土构件中配置型钢,同时也配有少量构造和受力钢筋的钢与混凝土组合结构。对于同等截面而言,型钢混凝土结构比普通钢筋混凝土结构的承载能力和刚度显著提高,尤其适合应用于大跨、重载及高层、超高层建筑中。另外,型钢混凝土结构还具有十分良好的延性和耗能能力,因而特别适用于地震区。相比钢结构建筑而言,型钢混凝土结构可大量节省钢材,降低造价,弥补了钢结构建筑防腐、防锈、防火性能差和维护费用高的弱点。因而,在当前高层及超高层建筑及大跨、重载结构中采用型钢混凝土结构已成为工程结构研究与工程应用的热点领域。

但是,随着跨度的增加或荷载的加大(如重载结构),正常使用极限状态的限制(如裂缝控制条件)条件往往会影响型钢混凝土结构上述优越性的发挥,而预应力技术则可以实现对构件拉应力区的应力控制,从而显著改善构件在正常使用阶段的工作性能。为此,若将预应力和型钢混凝土技术结合起来,所形成的预应力型钢混凝土结构新体系将具有预

应力结构和型钢混凝土结构的双重优点。这种组合结构可利用型钢混凝土技术提高结构的承载能力,利用预应力技术改善型钢混凝土结构在正常使用极限状态下的性能(如裂缝控制、变形控制等),进而形成一种预应力型钢混凝土组合结构新体系,从而可为组合结构技术的发展与应用以及结构体系的创新开辟更广阔的前景。

多年来,基于上述概念和思想,作者对预应力型钢混凝土这种新型组合结构进行了一系列的研究和探索,就该体系的结构性能、计算理论、设计方法及构造措施等进行了相应的理论与试验研究,提出了相应的设计计算理论与技术建议,并紧密结合实际工程,将研究成果应用于工程实践中,取得了显著的社会效益与经济效益。本书着重介绍了作者多年来在上述领域的研究成果和工程应用实例,旨在将相应研究成果及时与相关科研与工程技术人员共享,从而能为推动预应力型钢混凝土这一新技术的发展起到抛砖引玉的作用。

在研究工作中作者得到了吕志涛院士、蒋永生教授的热心指导,东南大学梁书亭教授、陈忠范教授和戴国亮副教授对试验研究工作给予了积极帮助和支持,研究生李玉莹、孙晓波、徐杰、赵国栋、杨昊、王怀阔、张鸣、王兰芹等对试验研究工作付出了辛勤劳动,博士生李玉莹还参与了本书的部分工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于该领域的研究和探索尚处于起步阶段,再加上作者水平有限,所以本书所述内容难免有欠缺之处,敬请广大读者批评指正。

傅传国

2007年4月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 预应力混凝土结构发展综述	1
1.1.1 国外试验研究概况	2
1.1.2 我国的研究进展	4
1.2 型钢混凝土结构发展综述	6
1.2.1 国外型钢混凝土结构的发展	7
1.2.2 我国的应用与研究现状	9
1.2.3 型钢混凝土结构设计方法比较	10
1.3 预应力型钢混凝土结构及其发展前景	12
1.3.1 预应力型钢混凝土结构的比较优势	13
1.3.2 预应力型钢混凝土结构的理论与试验研究	16
第二章 改进综合内力法计算现代预应力混凝土结构	18
2.1 综合内力、主内力和次内力的概念	18
2.2 当前预应力混凝土结构计算存在的问题及对策	21
2.2.1 存在的问题	21
2.2.2 工程实例分析	22
2.2.3 次内力法的特点	25
2.3 改进综合内力法	26
2.3.1 基本思路	26
2.3.2 基本假定	26
2.3.3 公式推导	27
2.3.4 改进综合内力法的设计计算步骤	29
2.3.5 预加力产生的混凝土法向应力计算	30
2.3.6 相对界限受压区高度	31
2.3.7 受弯承载力计算	31
2.3.8 受剪承载力计算	32
2.3.9 裂缝宽度计算	32
2.3.10 短期刚度计算	34
2.3.11 算例	35

2.4	结语	49
第三章	预应力型钢混凝土结构的计算	50
3.1	预应力型钢混凝土梁正截面受弯承载力计算	50
3.1.1	基本假定	50
3.1.2	界限受压区高度	51
3.1.3	计算公式	52
3.2	预应力型钢混凝土梁受剪承载力计算	54
3.3	预加力产生的混凝土法向应力计算	56
3.4	预应力型钢混凝土构件裂缝宽度验算	56
3.4.1	预应力型钢混凝土构件的裂缝宽度计算公式	56
3.4.2	预应力型钢混凝土构件受拉区纵向钢筋的等效应力	58
3.5	预应力型钢混凝土构件刚度	58
3.6	算例	59
3.7	结语	66
第四章	预应力型钢混凝土简支梁试验研究	67
4.1	引言	67
4.2	试件设计	67
4.3	试验测试内容及测点布置	69
4.3.1	混凝土应变测点布置	69
4.3.2	钢筋应变测点布置	69
4.3.3	型钢应变测点布置	69
4.3.4	挠度测量	70
4.3.5	裂缝观测	70
4.3.6	钢绞线应力、应变测量	70
4.4	试验加载方案及步骤	71
4.4.1	试验加载方案	71
4.4.2	试验加载制度	72
4.5	试验现象描述	73
4.5.1	正截面破坏特征	73
4.5.2	裂缝的出现、分布和开展	74
4.5.3	弯矩-挠度曲线	79
4.5.4	截面应变特性	80
4.5.5	裂缝的闭合性	82
4.6	理论计算与试验结果比较	83

4.6.1	预应力型钢混凝土梁开裂弯矩、极限弯矩理论计算值与试验结果的比较	83
4.6.2	预应力型钢混凝土梁裂缝宽度计算值与试验结果的比较	83
4.6.3	预应力型钢混凝土梁刚度计算	84
4.7	结语	85
第五章	预应力和非预应力型钢混凝土框架结构受力与抗震性能对比试验研究	86
5.1	试件设计与制作	86
5.1.1	试件尺寸	86
5.1.2	预应力筋的张拉	86
5.1.3	材料的力学性能	88
5.2	测点布置	89
5.3	加载装置与加载制度	90
5.4	试验过程与现象描述	92
5.5	试验现象分析	96
5.6	结语	108
第六章	预应力和非预应力型钢混凝土框架在低周反复荷载作用下的滞回性能理论分析	109
6.1	梁柱恢复力模型	109
6.2	恢复力曲线模型特征参数	111
6.2.1	屈服弯矩 $\bar{M}_y$ 和曲率 ϕ_y	111
6.2.2	极限弯矩 $\bar{M}_u$ 和曲率 ϕ_u	117
6.2.3	完全屈服弯矩 $\bar{M}_{sy}$ 和曲率 ϕ_{sy}	118
6.3	预应力与非预应力型钢混凝土框架结构的滞回性能分析	119
6.4	结语	122
第七章	型钢混凝土叠层空腹桁架转换结构模型受力与抗震性能试验研究	123
7.1	引言	123
7.2	试验概况	123
7.2.1	试件设计与制作	123
7.2.2	测点的布置	127
7.2.3	加载方式	128
7.2.4	加载制度	129
7.3	试验结果及分析	129
7.3.1	试验现象描述	129

7.3.2	试验结果的对比分析	133
7.4	结语	140
第八章	大跨度预应力型钢混凝土叠层空腹桁架转换结构模型竖向加载及拟动力抗震性能试验研究	141
8.1	引言	141
8.2	试验概况	142
8.2.1	模型设计与制作	142
8.2.2	测点的布置	144
8.2.3	加载方式及顺序	147
8.2.4	模型竖向加载制度	147
8.2.5	水平拟动力加载制度	147
8.3	试验结果及分析	152
8.3.1	试验现象描述	152
8.3.2	试验结果的对比分析	165
8.4	弹塑性动力反应分析	169
8.5	结语	172
第九章	大跨度叠层空腹桁架转换结构体系的力学特点及工程应用	173
9.1	引言	173
9.2	叠层空腹桁架转换结构不同结构布置方案的受力特点分析	176
9.2.1	竖向荷载作用下不同杆件布置方案对转换结构受力与变形特点的影响分析	177
9.2.2	水平荷载作用下各转换结构方案的受力与变形特点	183
9.2.3	杆件刚度变化对转换结构体系受力性能的影响分析	185
9.2.4	大跨度叠层空腹桁架转换结构的工作特点	188
9.3	叠层空腹桁架转换结构预应力施加及预应力筋布置方案的分析与讨论	188
9.3.1	预应力筋抛物线形布置	191
9.3.2	预应力筋折线形布置	192
9.3.3	预应力筋直线形布置	192
9.3.4	关于平衡荷载的取值	193
9.4	叠层空腹桁架转换结构中梁的有效翼缘宽度分析	193
9.4.1	空间分析模型	194
9.4.2	预应力梁的有效翼缘宽度	195
9.4.3	小结	203

9.5 叠层空腹桁架转换结构整体弯曲对现浇混凝土楼盖受力的影响分析	204
9.5.1 简述	204
9.5.2 空间分析模型	204
9.5.3 楼板的变形特点及内力分布规律	205
9.5.4 结论及设计建议	207
第十章 大跨度预应力型钢混凝土叠层空腹桁架转换结构现场实测	208
10.1 引言	208
10.2 监测项目及测点的布置	208
10.3 监测过程及结果	208
10.4 结语	217
第十一章 预应力型钢混凝土结构相关技术及设计建议	218
11.1 引言	218
11.2 预应力型钢混凝土结构设计建议	218
11.2.1 结构体系选择	218
11.2.2 预应力型钢混凝土梁截面的选取	219
11.2.3 结构阻尼比	219
11.2.4 框架截面尺寸	219
11.2.5 内力计算	220
11.2.6 预应力筋数量的估算	220
11.2.7 综合内力计算	221
11.2.8 改进综合内力计算	221
11.2.9 荷载效应组合	222
11.2.10 抗弯承载力计算	223
11.2.11 抗剪承载力验算	224
11.2.12 裂缝宽度验算	225
11.2.13 挠度验算	226
11.2.14 预应力型钢混凝土框架梁柱节点	227
11.3 构造要求及相关建议	227
11.3.1 材料	227
11.3.2 构件抗震等级	231
11.3.3 高度和侧移	233
11.3.4 构造要求	235
参考文献	240

第一章 绪 论

1.1 预应力混凝土结构发展综述

早在 19 世纪后期,就有学者提出了对混凝土施加预应力的设想。而预应力混凝土进入实际应用,却是在研制出较高强度的钢材、锚具并充分认识到混凝土的收缩、徐变及其对预应力效应的影响之后,大约在 20 世纪 30 年代才开始的^[1~3]。

1928 年以前,预应力混凝土技术基本上处于探索阶段,那时只有一些少量的局部设想和试制,而且先后都失败了。预应力混凝土在早期活动中提出的各种方法与专利,由于当时对混凝土和钢材在应力状态下的性能缺少认识,施加的预应力太小,效果不明显,所以没能得到推广应用。

预应力混凝土进入实用阶段与法国工程师 Freyssinet 的贡献是分不开的。他在对混凝土和钢材性能进行大量研究和总结前人经验的基础上,考虑到混凝土的收缩和徐变产生的损失,于 1928 年指出预应力混凝土必须采用高强钢材和高强混凝土。Freyssinet 这一论断是预应力混凝土在理论上的关键性突破。从此,对预应力混凝土的认识开始进入理性阶段,但对预应力混凝土的生产工艺,当时并没有改进。

1938 年德国的 Hoyor 研究成功靠高强细钢丝(直径 0.5~2mm)和混凝土之间的粘结力而不是靠锚头传力的先张法,可以在长达百米的墩式台座上一次同时生产多根构件。1939 年, Freyssinet 研究成功锚固钢丝束的弗式锥形锚具及其配套的双作用张拉千斤顶。1940 年,比利时的 Magel 研究成功一次可以张拉两根钢丝的麦尼尔模块锚。这些成就为推广先张法与后张法预应力混凝土提供了切实可行的生产工艺。

随着预应力技术的发展与进步,尤其近 30 多年来,预应力混凝土结构理论和设计方法有了显著的进展,部分预应力混凝土的设计思想广泛传播,同时促进了具有全预应力混凝土和钢筋混凝土两者优点的部分预应力混凝土结构的迅速发展。在结构理论方面,近几年来,国内外学者对部分预应力混凝土和无粘结预应力混凝土结构的性能进行了深入研究,对超静定预应力结构的次弯矩、非线性性能、弯矩重分布与调幅以及极限承载力方面进行了较深入的试验研究和计算分析,对预应力混凝土结构的抗震性能也进行了广泛研究,这些研究成果有利的推动了预应力技术的进步和广泛应用。

预应力发展到今天,不仅广泛应用于桥梁、建筑、枕轨、桩、压力管道、储罐、水

塔等,而且也扩大应用到高层、高耸、大跨、重载结构及抗震结构等许多领域。但长期以来,国际上对预应力混凝土结构的抗震性能存在较大的意见分歧,其抗震性能研究也一直是预应力混凝土结构研究的重点之一。

结构在地震作用下的反应主要取决于主抗侧结构的性能,在结构中零散的、个别的预应力混凝土构件的应用一般不会显著地改变原主抗侧结构的抗震性能。预应力混凝土框架结构既是主要承重结构,又是主要抗侧力结构,因而它能明显反映预应力混凝土结构的抗震特性。所以,研究预应力混凝土框架结构的抗震性能,对研究预应力混凝土结构的抗震性能问题具有代表性。国内外对预应力混凝土框架(PCF)结构与构件的抗震性能已进行了大量试验研究,取得了较丰富的研究成果。

1.1.1 国外试验研究概况

在国际上,预应力混凝土结构的抗震性能引起众多学者的重视是在1965年的第三届世界地震工程会议上。Despeyroux在会上正式提出了以预应力混凝土结构作为主抗震结构的有关问题^[4]。问题一经提出,就引起世界上许多著名抗震与预应力混凝土专家的关注,并出现两派明显对立的意见。当时,对预应力混凝土结构的抗震问题主要关注以下几点:①承受反复荷载时,构件中偏心的预应力筋是否会产生不利影响;②它是否有较好的延性,特别是吸收和耗散地震能量的能力;③如何进行预应力混凝土框架节点的设计;④由于预应力混凝土构件的截面高度比同条件下钢筋混凝土构件的截面高度小,因而结构较柔,将会带来一些问题;⑤预应力混凝土结构的地震作用特别是底部总剪力如何确定;⑥在地震区如何选择适用的预应力混凝土结构的形式。而以林同炎^[5]为代表的一些预应力技术专家充分肯定了预应力混凝土结构的抗震性能。

1974年在FIP第七届大会上,FIP抗震结构委员会主席Ban代表抗震委员会向大会提交了预应力混凝土结构的抗震问题专门报告,报告中明确指出了预应力混凝土构件的抗震性能并不比钢筋混凝土构件差,但在地震区大量采用预应力混凝土结构还需要进行认真的研究工作。

1969年Paranagama^[6]等对先张法预应力混凝土梁进行了重复加载试验研究,其加载方式为静力方式。结果表明:①在经历重复荷载后,梁的极限承载力和极限变形能力没有显著降低。②卸载曲线大约可分为三个阶段:第一阶段较短,梁的刚度较高,且随着荷载的增加而降低;第二阶段刚度更低,且随着每次幅值均有增加的加载次数增加而降低;第三阶段刚度又有增加,仅稍低于初始刚度。③重复加载曲线大约有两个线性阶段:第一个阶段的刚度约等于初始刚度;第二阶段的刚度与卸载曲线第二阶段的刚度相差不多。④卸载曲线与加载曲线大约在相应于该次循环的最大荷载值的90%处相交。⑤梁的刚度主要由加载历史所达到的最大荷载值决定。⑥单调加载曲线能较好的作为重复加载曲线包络线的近似。

1978年Urban Vladimir^[7]等也对120根有粘结预应力混凝土梁进行了重复

加载试验研究。他们的研究成果表明:①预应力混凝土梁在反复荷载作用下其承载力并不随以往的过载而降低;②在接近极限荷载的重复荷载作用下,梁的刚度有所降低。

1965年,Nakano^[8]探讨了四层有粘结单跨预应力混凝土框架在水平反复荷载下的特性。水平荷载加在各层楼面处。梁、柱和节点均用后张灌浆法施加了预应力。研究表明:①预应力混凝土框架呈现出较好的变形恢复力特性,滞回阻尼远小于相应的钢筋混凝土框架结构;②预应力混凝土框架具有足够的位移延性,而且刚度退化较小;③比较光滑的荷载位移滞回曲线,是因框架结构多个杆件的综合效应形成的。

1979年,Maguruma^[9]由单层单跨后张预应力混凝土框架试验得出结论:荷载位移滞回曲线呈弓形,位移延性系数约为4,但因框架构件较少,骨架曲线有较明显的突变点。

1978年,Park和Thompson^[10]对接近足尺的预应力混凝土框架边节点单元进行了反复加载试验研究。试件为十字形单元,梁、柱中的预应力筋均对称布置。试验研究后得到如下结论:①塑性铰区应配置足够密布的箍筋以防止由于混凝土压坏而使截面受弯承载力损失过多;②钢筋混凝土、部分预应力混凝土和预应力混凝土构件,它们的塑性铰长度均约为其截面高度的一半,且塑性铰长度不随加载次数的增加而改变;③节点区箍筋达到屈服的试件,节点区的受剪承载力控制了试件的承载力;④一些试件梁中的钢筋在节点区出现了粘结滑移,建议梁中钢筋直径与柱截面宽度相比不宜超过1/21,但波纹管中的预应力筋未发现有任何粘结滑移现象。

随着非线性动力反应分析的进展,大多数研究者的兴趣逐渐转移到研究预应力混凝土结构的恢复力特性上,主要关注预应力混凝土开裂后及接近框架结构耗能机制形成时结构的动力特性。

材料的动力特性表明:在动力荷载下,钢筋及混凝土的强度与刚度均大于静力荷载下的相应值,结构的塑性变形能力也有所增加。早期的研究者都有这样共同的观点,即预应力混凝土在动载下的特性与静载下的特性有很大的不同。在动力荷载下,预应力混凝土构件表现出更强的弹性性能及吸收能量的能力,且极限弯矩、开裂荷载及破坏时截面的极限曲率都有明显的增加。

1980年Thompson和Park^[11]用他们所提出的恢复力模型对单自由度的预应力混凝土框架进行了动力反应分析,输入的地震波为EL-Centro N-S分量和人工地震波。分析后得到的结论是:①框架的预应力度越低,位移延性要求越易满足;②阻尼越大,位移延性要求越低;③钢筋混凝土框架结构比预应力混凝土框架结构更容易发生永久变形;④尽管钢筋混凝土框架结构比预应力混凝土框架结构耗能能力强,但两者最大的位移反应差别不大;⑤框架结构一旦达到其抗侧能力极限,

预应力混凝土框架结构的振动周期会增大到结构初始弹性周期的两倍,从而使结构的位移反应减小,相应地,钢筋混凝土框架结构的振动周期则与初始振动周期非常相近,预应力混凝土框架结构的这种效应在一定程度上补偿了它们因耗能小引起的不足;⑥全预应力混凝土框架的最大位移反应比钢筋混凝土框架的最大位移反应平均要高 1.3 倍,其范围在 0.7~2.4 倍之间。

多遇地震作用下,预应力混凝土结构的位移反应要比钢筋混凝土结构位移反应大,这一结论为大多数研究者所认可,故在新西兰等国的设计规范中,对多遇地震作用下预应力混凝土结构,设有横向地震作用力应比相应的钢筋混凝土结构放大 1.2 倍的专门规定。

预应力混凝土框架结构有多种组成形式:①仅在梁中施加预应力;②仅在梁及节点中施加预应力;③梁、柱及节点中全部施加预应力;④仅在柱与节点施加预应力;⑤仅在边柱、梁与节点中施加预应力。试验研究表明,预应力混凝土结构用于承受重力荷载是成功的,并在地震作用下具有良好的工作性能。

1.1.2 我国的研究进展

预应力混凝土技术在我国应用和发展时间较短。1956 年以前基本上处于学习试制阶段,先是于 1950 年在上海等地学习和介绍国外预应力混凝土技术的经验,以后于 1954 年铁道部试制预应力混凝土枕轨,1955 年丰台桥梁厂开始试制 12m 跨度的桥梁。1956 年是准备推广预应力混凝土的重要一年,原北京工业设计院等单位试设计了一些预应力拱形和梯形屋架、屋面板、吊车梁。太原工程局等重点单位试制成功了跨度为 24m、30m 的桁架,跨度为 6m、吨位为 30t 的吊车梁,以及宽 1.5m、长 6m 的大型屋面板和预应力芯棒空心板等预应力混凝土结构。从 1957 年到 1964 年,预应力混凝土处于逐步推广阶段^[12,13]。

20 世纪 70 年代末期开始,以框架结构为主要代表的现代预应力混凝土结构体系逐步在我国应用。同时,工程设计人员也密切关注其抗震能力问题。人们普遍存在预应力混凝土结构抗震性能差的固有观念在一定程度上阻碍了我国预应力技术的推广应用。

为此,东南大学、中国建筑科学研究院及同济大学等单位^[12,14,15]先后进行了预应力混凝土构件、框架、门架和板柱等结构的抗震试验研究,着重研究了预应力度、预应力筋布置(特别是曲线非对称布置)、约束箍筋含量、梁柱线刚度比、各构件承载力比等参数对预应力混凝土结构及构件抗震性能的影响。

1991 年,东南大学^[15]针对多层多跨预应力混凝土框架梁中配筋是由关键截面抗裂度控制的特点,提出了这种框架的设计应采用混合耗能机制的概念。

同济大学^[14]进行了有粘结与无粘结单层单跨预应力混凝土框架的伪静力与动力试验研究,但其梁柱都采取对称配置预应力筋。通过伪静力试验研究得出如下

结论:预应力混凝土框架在承受反复荷载时,框架会形成梁铰机制或混合机制。框架经过反复位移而严重损伤后,在有粘结预应力混凝土框架构件的塑性铰区段,预应力损失可达到 $70\% \sigma_{pe}$ (σ_{pe} 为预应力筋的有效预应力)。有粘结预应力混凝土框架与无粘结框架相比,前者承载力较高,耗能较多,但后者的恢复性能好。在框架承受大幅位移时,有粘结预应力筋可能由受拉转为受压。

同时,通过预应力混凝土框架的动力试验后认为:其在经受强烈持久的模拟地震激励后仍难倒塌,表现出良好的抗震恢复性能。比较研究表明,预应力混凝土框架的抗震能力优于钢筋混凝土框架,但激励后,耗能机制不完全都是梁铰机制。

此外,北京市建筑设计研究院^[16]、重庆建筑大学^[17]、长沙铁道学院^[18]等单位也进行了多个预应力混凝土框架梁柱节点的抗震性能试验和无粘结预应力混凝土框架竖向地震作用下的试验,取得了一定的成果。

东南大学与华东预应力技术联合开发中心^[19]对预应力混凝土结构在我国的推广应用起到了重要的作用。东南大学对预应力混凝土框架结构的设计方法进行了较系统的研究,其中抗震性能与设计方法是一个重要研究课题。1985 年以来,就预应力混凝土梁、梁柱节点、预应力混凝土柱及预应力混凝土框架在反复荷载及动力荷载下的性能进行了试验研究,分析了它们的抗震特性及提高延性的措施。相继进行了 20 多根预应力混凝土梁、8 个预应力混凝土框架外节点、9 根预应力混凝土柱、4 榀单层单跨预应力混凝土框架、1 榀钢筋混凝土单层单跨框架在低周反复荷载下试验研究以及两榀 1/8 比例的预应力混凝土框架模型振动台的试验研究。

2000 年,东南大学通过预应力混凝土框架结构合理耗能机制的选择、推覆分析(pushover analysis)的建立及结构的延性二次设计、框架内节点抗剪性能、柱箍筋配置量的计算分析、双层双跨预应力框架及复式框架的反复荷载试验等五个方面的研究,得到如下主要结论:

1) 在结构抗震设计中,对单跨预应力混凝土框架应采用“梁铰机制”,对大跨度重力荷载控制梁配筋的多跨预应力混凝土框架应采用“混合耗能机制”,对这两种耗能机制,都应采取一定的构造措施以避免框架边柱出铰。

2) 对按照两种极限状态第一次设计或已建成的预应力混凝土框架结构,可用推覆分析方法及程序进行结构的抗震能力分析。pushover 分析方法可提供框架结构的出铰顺序、各塑性铰在结构有约束弹塑性区的转角要求、基底总剪力及与顶点位移或各层间位移的非线性曲线,使设计者容易验证所选的耗能机制是否能够实现,并可判别第一次设计的预应力混凝土框架结构在地震作用下的薄弱点。

3) 根据能量原理,并以结构的 pushover 分析得到的基底剪力-位移曲线为基础,可对不同地震烈度区预应力混凝土框架的位移延性要求作出定量计算,从而可得到框架结构塑性铰出现的数目以及转角要求、罕遇地震下结构的受力状态,评判结构的抗震能力。

4) 多层多跨预应力混凝土框架结构内节点的受剪承载力是抗震能力的主要

控制因素。对不对称配筋与对称配筋的内节点的抗剪性能分析表明,跨高比大、抗裂度要求高是框架内节点易剪切破坏的主要原因;因此,建议对“梁铰机制”的框架及对“混合机制”的框架通过限制梁柱宽度比及梁端加腋的办法来避免内节点受剪破坏。

综上所述,已有的研究成果和震后调查表明:预应力混凝土框架结构的抗震能力并不比钢筋混凝土框架结构差。以前人们存在预应力混凝土结构抗震性能差的观念主要是来自于梁的试验,而不是整体框架的试验。而且,梁中预应力筋(穿过梁柱节点)使节点区混凝土处于双向受压状态,增大了核心区对角桁架压杆的面积,有助于保持核心区的受剪承载力与刚度。

1.2 型钢混凝土结构发展综述

型钢混凝土(steel reinforced concrete,以下简称 SRC)结构是指在型钢周围布置钢筋,并浇筑混凝土的结构。型钢分为实腹式和空腹式。实腹式 SRC 构件具有较好的抗震性能,而空腹式 SRC 构件的抗震性能与普通混凝土(reinforced concrete,以下简称 RC)构件基本相同。因此,目前在抗震结构中多采用实腹式 SRC 构件,但对于截面高度较大的转换梁来说,空腹式型钢(如格构式)较为适宜。实腹式型钢可由钢板焊接拼制而成或直接采用轧制型钢。

常用的 SRC 梁、柱构件截面形式如图 1.1 所示。

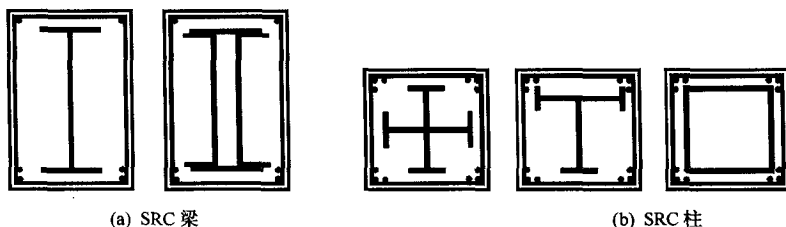


图 1.1 常用的 SRC 梁、柱构件截面形式

SRC 构件的内部型钢与外包混凝土形成整体、共同受力,其受力性能优于这两种结构的简单叠加。与钢结构相比,SRC 构件的外包混凝土可以防止钢构件的局部屈曲,并能提高钢构件的整体刚度,显著改善钢构件出平面扭转屈曲性能,使钢材的强度得以充分发挥。采用 SRC 结构,一般可比纯钢结构节约钢材达 50% 以上。此外,外包混凝土增加了结构的耐久性和耐火性,欧美国家最初发展 SRC 结构就是出于对钢结构防火和耐久性方面的考虑。与 RC 结构相比,由于配置了型钢,大大提高了构件的承载力,尤其是采用实腹型钢的 SRC 构件,其抗剪承载力有很大提高,并大大改善了受剪破坏时的脆性性质,提高了结构的抗震性能。正是由于这一点,SRC 结构在地震多发的日本得到广泛应用。

型钢混凝土框架分为全型钢混凝土框架和半型钢混凝土框架两类。框架的梁和柱均采用型钢混凝土结构的框架为全型钢混凝土框架;由钢梁和型钢混凝土柱刚性连接所作成的框架,称为半型钢混凝土框架。在半型钢混凝土框架中,有一种是钢筋混凝土梁和型钢混凝土柱刚性连接所组成的框架,在我国应用和研究较多,这种框架也称为次型钢混凝土框架。

1.2.1 国外型钢混凝土结构的发展

SRC 柱已有近百年的历史,1904 年在英国,为了提高钢柱的耐火、耐腐蚀性能,人们用混凝土把钢柱包裹起来,形成了 SRC 柱的雏形^[20]。第二次世界大战以后,欧洲急需恢复战争破坏的房屋和桥梁,工程师们采用了大量的组合结构,节约了钢材并取得良好的经济效益。50 多年来组合结构的研究与应用得到迅速发展,已成为公认的新的结构体系,与传统的四大结构(钢、木、砌体、钢筋混凝土)并列,成为第五大结构。SRC 结构作为组合结构的重要类型,也取得了迅速的发展。

从 20 世纪 50 年代开始,很多学者对 SRC 构件的性能进行大量试验和研究,在计算模型、计算和分析方法及简化计算等方面做了大量工作。

20 世纪初,欧美就开始对 SRC 柱进行研究。1908 年 Burr 做了空腹式 SRC 柱的试验,发现混凝土的外壳能使柱的强度和刚度明显提高。1923 年加拿大开始做空腹式配钢的 SRC 梁的试验。其后,英国的 Johnson、美国的 Cook 等学者进行了大量试验研究。起初,在钢柱外包上混凝土是为满足钢结构的防火要求,包混凝土钢柱仍按钢柱设计。1940 年后开始意识到混凝土对提高钢柱刚度的有利作用,考虑折算刚度后仍继续沿用钢柱设计方法。19 世纪 60 年代初,英国改进了 SRC 柱设计方法。Bondnal 在帝国学院作了一系列试验,提出了描述工作性能的强度理论。Basu 进行了设计方法的广泛理论研究,于 1967 年出版了理论分析资料,对不同截面不同长细比的 SRC 柱进行了大量试验,发现这些柱子性能可以通过三个参数来实现^[21]。1969 年 Basu^[22]发表了以伯理-罗伯特逊的屈曲曲线为基础的设计方法,这种设计方法成为现行设计方法的基础。1975 年 Virdi 和 Dowling^[23]借助设计曲线与大量 SRC 理论的分析及 100 多根柱破坏试验结果,证明了利用纯钢柱欧洲曲线并引入新长细比定义这一方法来计算 SRC 柱的轴向破坏荷载是行之有效的。这种方法不仅提高了设计精度,而且还证明了 SRC 柱与钢柱内在的联系。对于偏压柱采用特定系数表示的直线和抛物线逼近柱子 $M-N$ 相关曲线,根据这些特定系数确定柱子界面强度^[24]。该方法一直沿用,并编入了 1985 年欧洲统一规范《组合结构》(EC4)。

在 1989 年的美国钢筋混凝土设计规范 ACI-318^[25]中,将型钢视为等值的钢筋,然后再以 RC 结构的设计方法进行 SRC 构件设计。这种方法的优点在于对 SRC 结构设计时考虑了构件的“变形协调”和“内力平衡”,但没有考虑型钢材料本身的残余应力和初始位移。在 1993 年的《钢结构设计规范》(AISC-LRFD)^[26]中,