

钢与混凝土组合结构 理论与计算

王连广 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了作者十几年来从事钢与混凝土组合结构研究的成果,以及国内外其他学者的相关研究工作。全书共 18 章,介绍了钢与混凝土组合结构应用与研究动态;阐述了混凝土及钢材的本构关系,给出了钢与混凝土组合材料本构关系;专题研究了钢与混凝土简支(连续)组合梁、预应力组合梁、钢板与混凝土组合梁、外包钢混凝土结构、压型钢板混凝土组合楼板、钢骨混凝土结构构件(剪力墙及框架体系)等基本理论、设计方法及全过程非线性分析理论;研究了组合梁徐变效应分析理论与计算方法;阐述了剪力连接件工作机理及其在组合梁中的设计原则;介绍了圆(方)形钢管混凝土结构的基本设计方法。

本书可供从事土木工程、水利工程及海洋结构工程的科技人员和高等院校的教师、研究生及高年级的本科生参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢与混凝土组合结构理论与计算/王连广著. 北京:科学出版社,2005
ISBN 7-03-014615-8

I. 钢… II. 王… III. ①钢筋混凝土结构:组合结构—结构分析
②钢筋混凝土结构:组合结构—结构计算 IV. TU 375

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 119485 号

责任编辑:童安齐 刘剑波 何舒民/ 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>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 3 月第 一 版 开本:B5 (720×1000)
2005 年 3 月第一次印刷 印张:27 1/2
印数:1—2 500 字数:527 800

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)

前 言

随着国民经济的快速发展,人们对物质文化生活需求的日益提高,使建筑结构已面临着新的挑战,人们总想在有限的建筑面积和空间内获得最好的使用功能和最佳的投资回报,由此促进了建筑结构向着大柱网、大开间、大跨度及多功能方向发展,而传统的结构在某些方面已满足不了其要求,钢与混凝土组合结构以其承载力高、自重轻、节约材料、截面尺寸小、抗震性能好及改善结构功能等突出优点,迎合着建筑结构的发展。钢与混凝土组合结构在很多实际工程中得到了应用,尤其是近 20 年来该结构已在大跨度桥梁、工业厂房、城市立交桥及高层与超高层建筑等重要工程中得到广泛应用,取得了良好的经济效益和社会效益。同时,广大科技人员在理论研究方面也做了大量工作,取得了令人瞩目的研究成果。

本书除介绍作者十几年来的研究工作外,还适当地介绍了国内外其他学者的部分研究成果,目的是使读者对本研究领域有一个更全面的了解。全书共 18 章。第 1 章绪论,综述了钢与混凝土组合结构研究和应用的主要进展;第 2 章组合材料强度准则及本构关系,主要介绍混凝土、钢材及其组合材料的本构关系;第 3 章钢与混凝土组合梁,通过试验,分析了组合梁的抗裂、变形、滑移及内力重分布等力学性能,专题讨论了钢与混凝土简支(连续)组合梁的弹(塑)性设计方法,建立其承载力、交接面滑移及变形等计算公式;第 4 章钢与混凝土预应力组合梁,通过试验,分析了预应力组合梁的变形、滑移及预应力钢筋受力等力学性能,专题讨论了预应力组合梁的弹(塑)性设计方法,建立其承载力及交接面滑移影响下的变形计算公式;第 5 章组合梁徐变效应分析,阐述了混凝土徐变效应分析理论,建立了组合梁徐变效应计算模型,研制了计算程序,分析了徐变效应对组合梁力学性能的影响;第 6 章钢板与混凝土组合梁,通过试验,分析了组合梁的变形及交接面滑移等力学性能,专题研究其抗裂性能及弹(塑)性设计方法,建立交接面滑移及其影响下的变形计算公式,利用研制的全过程非线性分析程序,分析其工作性能;第 7 章剪力连接件设计,介绍栓钉、方钢、弯筋及槽钢连接件的工作机理、破坏模式及抗剪承载力等,并给出连接件在组合梁中的设计准则;第 8 章钢与混凝土组合梁计算分析,阐述了利用“合成法”分析组合梁工作性能的理论,研制了基于“合成法”的组合梁非线性全过程分析程序,给出了适合于组合梁平面、空间分析的四节点等参单元、平面连接单元、矩形薄板单元、矩形组合板单元、层状单元及空间连接单元分析模型,研制组合梁平面、空间有限元分析程序,计算分析了组合梁的承载力、变形、滑移及竖向掀起等性能;第 9 章钢桁架与混凝土组合梁计算分析,给出了适合于钢桁架与

混凝土组合梁平面、空间分析的平面杆单元和梁单元、空间杆单元和梁单元的分析模型,研制钢桁架与混凝土组合梁空间有限元分析程序,计算分析其变形、滑移及竖向掀起等性能;第10章压型钢板混凝土组合楼板,介绍组合楼板的类型、构造及设计方法;第11章外包钢混凝土结构,通过试验,分析外包钢混凝土梁、柱的受力性能,给出外包钢混凝土梁的弹(塑)性极限承载力、刚度、变形及柱的承载力计算公式;第12章钢骨混凝土梁,通过试验,阐述了钢骨混凝土梁的受力、变形、滑移及破坏模式等性能,建立其正截面抗弯承载力、斜截面抗剪承载力、抗弯刚度、抗裂度、交接面滑移及滑移影响下的变形计算公式;第13章钢骨混凝土柱,通过试验,阐述了钢骨混凝土柱的受力、变形、延性与耗能能力等,建立轴心受压柱承载力、框架柱的正截面抗裂与抗弯、斜截面抗裂与抗剪承载力计算公式;第14章钢骨混凝土结构构件计算分析,阐述利用“合成法”分析钢骨混凝土受弯构件、轴心受压构件、压弯构件和偏压构件工作性能的理论,研制了基于“合成法”的受弯构件全过程分析程序,给出了适合于钢骨混凝土梁平面分析的三角形单元及连接单元分析模型,研制钢骨混凝土梁的平面有限元分析程序,计算分析了钢骨混凝土梁的承载力、变形及应力分布等;第15章钢骨混凝土结构梁柱节点,通过试验,分析了钢骨混凝土柱与钢筋混凝土梁边节点的受力过程、延性与耗能能力及剪切变形等,研究了该类节点的抗剪机理,建立了该类节点核心区的抗裂、抗剪承载力计算公式;第16章钢骨混凝土剪力墙,介绍了钢骨混凝土剪力墙构造与类型,给出了钢骨混凝土剪力墙的正截面偏心受压与受拉及斜截面抗剪承载力计算公式,给出了钢骨混凝土剪力墙非线性分析方法;第17章钢骨混凝土框架结构弹塑性动力分析,评述了现有的恢复力模型,给出了钢骨混凝土结构的恢复力模型,介绍了适合于钢骨混凝土结构的计算力学模型,研制了钢骨混凝土结构框架体系的动力分析程序,计算分析了钢骨混凝土框架结构的动力特性;第18章钢管混凝土结构,介绍了圆钢管混凝土轴心受压柱、轴心受拉柱及偏心受压柱工作原理及承载力计算公式,介绍了国内外有关设计规范或规程中关于方钢管混凝土柱的承载力计算公式。

作者在从事钢与混凝土组合结构的研究过程中,部分研究成果通过了有关部门组织的鉴定,曾得到大连理工大学赵国藩院士和长江学者李宏男教授、辽宁省建筑设计研究院林立岩设计大师、辽宁省建筑科学研究院总工程师王增泽高级工程师、辽宁工程技术大学张向东教授和殷志向教授、鞍山科技大学郭连军教授、东北大学朱浮声教授、辽宁省金帝建设集团股份有限公司曹阅总工、中国海洋大学黄维平教授、同济大学博士后蒋东红博士的热情鼓励和支持,他们曾给予作者许多建议和指导,使作者受益匪浅;作者的很多工作是在博士导师刘之洋教授、博士后导师强士中教授和李乔教授指导下完成的,刘之洋教授在百忙之中审阅了全书,并提出许多宝贵意见;研究生徐亚丰博士、许伟博士、刘莉博士、张海霞博士、吴利权硕士、张军涛硕士等均对本书做出了贡献。借此机会对前辈、导师和所有合作者表示最诚

挚的谢意。

本书在写作过程中引用了国内外同行的研究成果,在此表示最衷心的感谢!
由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

王连广
2004年8月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 钢与混凝土组合梁	1
1.2 压型钢板混凝土组合楼板	3
1.3 钢骨混凝土结构	4
1.4 外包钢混凝土结构	7
1.5 钢管混凝土结构	8
第2章 组合材料强度准则及本构关系	10
2.1 混凝土强度准则	10
2.1.1 单向受力破坏准则	10
2.1.2 双向受力破坏准则	10
2.1.3 三向受力破坏准则	14
2.2 混凝土本构关系	17
2.2.1 单轴受压本构关系	17
2.2.2 单轴受拉本构关系	20
2.2.3 弹性本构关系矩阵	22
2.2.4 弹塑性本构关系矩阵——变形理论	32
2.2.5 弹塑性本构关系矩阵——增量理论	32
2.2.6 开裂状态本构关系	35
2.3 钢材本构关系	39
2.3.1 弹塑性本构关系	39
2.3.2 简化本构关系	42
2.4 组合材料本构关系	42
第3章 钢与混凝土组合梁	46
3.1 试验研究	46
3.1.1 试验概况	46
3.1.2 试验结果分析	47
3.2 弹性分析	51
3.2.1 构造要求	51
3.2.2 翼缘板有效宽度	52
3.2.3 截面特征	55

3.2.4	截面应力	58
3.3	塑性分析	60
3.3.1	抗弯承载力	61
3.3.2	抗剪承载力	63
3.4	组合梁交接面滑移	63
3.4.1	滑移微分方程	63
3.4.2	相对滑移计算	65
3.5	组合梁变形	66
3.6	钢与混凝土连续组合梁	70
3.6.1	试验研究	71
3.6.2	中间支座截面抗弯承载力	76
3.6.3	中间支座截面抗剪承载力	78
3.6.4	正常使用阶段应力分析	79
3.6.5	变形计算	81
3.6.6	裂缝宽度	82
第4章	钢与混凝土预应力组合梁	84
4.1	试验研究	84
4.1.1	试验概况	84
4.1.2	试验结果分析	85
4.2	预应力组合梁设计	89
4.2.1	初步设计	89
4.2.2	钢梁应力分析	90
4.3	承受正弯矩预应力组合梁	95
4.3.1	弹性分析	95
4.3.2	极限承载力	97
4.4	承受负弯矩预应力组合梁	98
4.4.1	弹性分析	99
4.4.2	极限承载力	103
4.5	预应力连续组合梁	105
4.5.1	弹性分析	105
4.5.2	极限承载力	107
4.6	滑移效应影响下的变形计算	110
4.6.1	变形微分方程	110
4.6.2	变形计算	112
第5章	组合梁徐变效应分析	114
5.1	混凝土徐变效应分析	114
5.1.1	混凝土徐变理论	114

5.1.2	徐变效应分析的基本方程	122
5.2	组合梁的徐变效应分析理论	126
5.2.1	短期荷载作用	127
5.2.2	长期荷载作用	131
5.3	组合梁徐变效应计算分析	137
5.3.1	内力与变形沿梁长分布	138
5.3.2	内力与变形随时间变化	139
第6章	钢板与混凝土组合梁	141
6.1	试验研究	141
6.1.1	试验概况	141
6.1.2	试验结果分析	142
6.2	抗裂承载力	144
6.2.1	开裂弯矩	144
6.2.2	裂缝宽度及间距	145
6.3	弹性分析	146
6.3.1	截面特征	146
6.3.2	截面应力	148
6.4	极限承载力	149
6.5	变形计算	152
6.5.1	换算截面法	152
6.5.2	滑移效应影响的变形	153
6.6	交接面滑移	155
6.7	基于合成法的全过程分析	156
6.7.1	合成法迭代方程	157
6.7.2	计算结果分析	158
第7章	剪力连接件设计	160
7.1	剪力连接件推出试验	160
7.2	栓钉连接件	161
7.3	方钢连接件	164
7.4	弯筋连接件	166
7.5	槽钢连接件	168
7.6	简支组合梁连接件设计	171
7.7	连续组合梁连接件设计	174
第8章	钢与混凝土组合梁计算分析	178
8.1	基于合成法的全过程分析	178
8.1.1	合成法迭代方程	178

8.1.2	弯矩与曲率	179
8.1.3	荷载与变形	181
8.2	非线性平面有限元分析	183
8.2.1	四边形等参单元	183
8.2.2	平面剪力连接件单元	186
8.2.3	计算结果分析	187
8.3	非线性空间有限元分析	188
8.3.1	矩形薄板单元	188
8.3.2	矩形组合板单元	193
8.3.3	层状单元	195
8.3.4	空间连接件单元	201
8.3.5	空间计算分析	203
第9章	钢桁架与混凝土组合梁计算分析	206
9.1	平面杆系结构	206
9.1.1	平面杆单元	206
9.1.2	平面梁单元	208
9.2	空间杆系结构	211
9.2.1	空间杆单元	211
9.2.2	空间梁单元	213
9.3	空间计算分析	216
第10章	压型钢板混凝土组合楼板	220
10.1	组合楼板类型	220
10.2	压型钢板截面特征	222
10.2.1	截面特征	222
10.2.2	翼缘有效宽度	223
10.3	组合楼板构造	225
10.4	组合楼板界限含钢率	227
10.5	组合楼板设计	228
10.5.1	设计荷载	229
10.5.2	截面承载力	230
10.5.3	变形计算	232
第11章	外包钢混凝土结构	234
11.1	梁的试验研究	235
11.1.1	试验概况	235
11.1.2	试验结果分析	235
11.2	梁的弹性分析	236
11.2.1	截面特征	237

11.2.2	截面应力	237
11.3	梁的极限承载力	238
11.3.1	抗弯承载力	238
11.3.2	抗剪承载力	240
11.4	受弯构件裂缝宽度与刚度	240
11.4.1	裂缝宽度	240
11.4.2	弯曲刚度	241
11.5	梁的变形	242
11.5.1	换算截面法的变形	242
11.5.2	滑移效应影响下的变形	243
11.6	柱的承载力计算	246
11.6.1	正截面承载力	246
11.6.2	斜截面抗剪承载力	247
第12章	钢骨混凝土梁	249
12.1	抗弯性能试验	249
12.2	抗裂承载力	253
12.3	抗弯承载力	255
12.4	抗弯刚度计算	261
12.4.1	变形协调法	261
12.4.2	刚度叠加法	265
12.4.3	折减刚度法	266
12.5	变形计算	266
12.6	滑移理论计算公式	270
12.7	抗剪性能试验	272
12.7.1	破坏模式与变形	272
12.7.2	影响抗剪能力的因素	274
12.8	抗剪承载力理论计算公式	275
12.9	抗剪承载力实用计算公式	280
12.9.1	剪切斜压破坏及弯剪破坏	281
12.9.2	剪切粘结破坏	283
12.9.3	抗剪承载力计算	284
12.10	裂缝宽度计算	284
12.10.1	垂直裂缝宽度	284
12.10.2	斜裂缝宽度	288
第13章	钢骨混凝土柱	290
13.1	轴心受压柱	290
13.1.1	试验研究	290

13.1.2 承载力计算	293
13.2 框架柱试验研究	293
13.3 正截面抗弯承载力	299
13.3.1 开裂荷载计算	299
13.3.2 抗弯承载力计算	300
13.4 斜截面抗剪承载力	307
13.4.1 开裂承载力计算	308
13.4.2 抗剪承载力计算	309
13.5 长柱承载力	315
第14章 钢筋混凝土结构构件计算分析	317
14.1 受弯构件全过程分析	317
14.1.1 合成法迭代方程	317
14.1.2 弯矩-曲率关系	322
14.1.3 荷载-变形关系	324
14.2 轴心受压构件全过程分析	326
14.3 压弯构件全过程分析	327
14.4 偏压构件全过程分析	329
14.5 非线性有限元分析	331
14.5.1 单元类型确定	331
14.5.2 平面三角形单元	331
14.5.3 联结单元	334
14.5.4 计算步骤	335
14.5.5 非线性计算分析	336
第15章 钢筋混凝土结构梁柱节点	339
15.1 节点试验研究	339
15.1.1 试验概况	339
15.1.2 试验结果分析	340
15.2 节点核心区抗裂承载力	348
15.3 节点核心区抗剪承载力	350
第16章 钢筋混凝土剪力墙	357
16.1 构造要求	357
16.2 偏心抗压承载力	358
16.3 偏心抗拉承载力	362
16.4 抗剪承载力	363
16.5 剪力墙非线性分析	366
16.5.1 有限元模型	366

16.5.2 非线性分析方法	367
第 17 章 钢筋混凝土框架结构弹塑性地震反应分析	370
17.1 现有恢复力模型评述	370
17.1.1 常见恢复力模型	370
17.1.2 滞回曲线特性	373
17.2 恢复力模型数学描述	374
17.3 钢筋混凝土结构的恢复力模型	376
17.3.1 基于试验的恢复力模型	376
17.3.2 基于数值计算的恢复力模型	379
17.4 计算力学模型	382
17.4.1 常见力学模型	382
17.4.2 单元刚度矩阵	384
17.5 结构矩阵分析	393
17.6 结构动力分析方法	394
17.7 算例分析	396
第 18 章 钢管混凝土结构	399
18.1 轴心受压构件	400
18.2 轴心受拉构件	405
18.3 偏心受压构件	405
18.4 方钢管混凝土柱	408
参考文献	413

CONTENTS

Foreword

Chapter1	Introduction	1
1.1	Composite Beams of Steel and Concrete	1
1.2	Composite Floor Slabs of Profiled Steel Sheeting and Concrete	3
1.3	Steel Reinforced Concrete Structures	4
1.4	External Steel Concrete Structures	7
1.5	Steel Tube Confined Concrete Structures	8
Chapter2	Strength Criterion and Constitutive Models of Composite Materials	10
2.1	Strength Criterion of Concrete	10
2.1.1	Strength Criterion under One Compression	10
2.1.2	Strength Criterion under Two-way Compression	10
2.1.3	Strength Criterion under Tri-axial Compression	14
2.2	Constitutive Relations of Concrete	17
2.2.1	Compression Constitutive Relations under One-Way	17
2.2.2	Tension Constitutive Relations under One-Way	20
2.2.3	Elastic Constitutive Relations Matrix	22
2.2.4	Elastic-Plastic Constitutive Relations-Deflection Theory	32
2.2.5	Elastic-Plastic Constitutive Relations-Increment Theory	32
2.2.6	Cracking State Constitutive Relations	35
2.3	Constitutive Relations of Steel	39
2.3.1	Elastic-Plastic Constitutive Relations	39
2.3.2	Reduction Constitutive Relations	42
2.4	Constitutive Relations of Composite Materials	42
Chapter3	Composite Beams of Steel and Concrete.....	46
3.1	Experimental Study	46
3.1.1	Outline of Tests	46
3.1.2	Analysis of Test Results	47
3.2	Elastic Analysis of Composite Beams	51
3.2.1	Construction of Composite Beams	51
3.2.2	Flange Plate Effective Width	52

3.2.3	Characteristic of the Cross-Section	55
3.2.4	Stresses of the Cross-Section	58
3.3	Plastic Analysis of Composite Beams	60
3.3.1	Flexural Strength	61
3.3.2	Shear Strength	63
3.4	Interface Slip of Composite Beams	63
3.4.1	Differential Equation of Interface Slip	63
3.4.2	Interface Slip Calculation	65
3.5	Deflection of Composite Beams	66
3.6	Continuous Composite Beams of Steel and Concrete	70
3.6.1	Experimental Study	71
3.6.2	Flexural Strength of Intermediate Support	76
3.6.3	Shear Strength of Intermediate Support	78
3.6.4	Stresses in Service	79
3.6.5	Deflection Calculation	81
3.6.6	Crack Width	82
Chapter 4	Prestressed Composite Beams of Steel and Concrete	84
4.1	Experimental Study	84
4.1.1	Outline of Tests	84
4.1.2	Analysis of Test Results	85
4.2	Design of Prestressed Composite Beams	89
4.2.1	Preliminary Design	89
4.2.2	Stresses Analysis of Steel Beam Cross-Section	90
4.3	Prestressed Composite Beams under Positive Moments	95
4.3.1	Elastic Analysis	95
4.3.2	Ultimate Strength	97
4.4	Prestressed Composite Beams under Negative Moments	98
4.4.1	Elastic Analysis	99
4.4.2	Ultimate Strength	103
4.5	Prestressed Continuous Composite Beams	105
4.5.1	Elastic Analysis	105
4.5.2	Ultimate Strength	107
4.6	Effect of Slip on Deflections	110
4.6.1	Differential Equation of Deflections	110
4.6.2	Deflections Calculation	112
Chapter 5	Creep Effects in Composite Beams	114
5.1	Creep Effects Analysis in Concrete	114

5.1.1	Creep Theory in Concrete	114
5.1.2	Basic Equation of Creep Analysis	122
5.2	Creep Theory Models in Composite Beams	126
5.2.1	Short-Term Analysis	127
5.2.2	Time-Dependent Analysis	131
5.3	Creep Calculation of Composite Beams	137
5.3.1	Distribution of Internal Force and Deflection along the Beam Length	138
5.3.2	Internal Force and Deflection Versus Time Relationship	139
Chapter6	Composite Beams of Steel Plate and Concrete	141
6.1	Experimental Study	141
6.1.1	Outline of Tests	141
6.1.2	Analysis of Test Results	142
6.2	Crack Strength	144
6.2.1	Crack Moment	144
6.2.2	Crack Width and Spacing	145
6.3	Elastic Analysis	146
6.3.1	Characteristics of the Cross-section	146
6.3.2	Stresses of the Cross-section	148
6.4	Ultimate Strength	149
6.5	Calculation of Deflections	152
6.5.1	Transformed Area Methods	152
6.5.2	Effect of Slip on Deflections	153
6.6	Interface Slip	155
6.7	Full-Range Analysis Base on Combined Methods	156
6.7.1	Combined Method Equation	157
6.7.2	Analysis of Calculation Results	158
Chapter7	Design Method of Shear Connectors	160
7.1	Tests on Shear Connectors	160
7.2	Stud Shear Connectors	161
7.3	Square Steel Shear Connectors	164
7.4	Bend Bar Shear Connectors	166
7.5	Channel Steel Shear Connectors	168
7.6	Connectors Design of Simply-Supported Composite Beams	171
7.7	Connectors Design of Continuous Composite Beams	174

Chapter8	Calculating Analysis of Composite Beam s	178
8.1	Full-Range Analysis Base on Combined Methods	178
8.1.1	Combined Method Equation	178
8.1.2	Moment-Curvature Relationship	179
8.1.3	Load Versus Deflection	181
8.2	Nonlinear Plane Finite Elemente Analysis	183
8.2.1	Quadrilateral Unit	183
8.2.2	Plane Shear Connector Unit	186
8.2.3	Analysis of Calculating Results	187
8.3	Nonlinear Space Finite Element Analysis	188
8.3.1	Rectangular Thin-Slab Unit	188
8.3.2	Rectangular Composite Slab Unit	193
8.3.3	Layered Unit	195
8.3.4	Space Connector Unit	201
8.3.5	Analysis of Space Calculation	203
Chapter9	Calculating Analysis of Steel Truss and Concrete Composite Beam s	206
9.1	Structures of Plane Bar System	206
9.1.1	Plane Bar Unit	206
9.1.2	Plane Beam Unit	208
9.2	Structures of Space Bar System	211
9.2.1	Space Bar Unit	211
9.2.2	Space Beam Unit	213
9.3	Space Calculating Analysis	216
Chapter10	Composite Floor Slabs of Profiled Steel Sheeting and Concrete	220
10.1	Type of Composite Floor Slabs	220
10.2	Cross-Section Characteristic of Profiled Steel Sheeting	222
10.2.1	Cross-Section Characteristic	222
10.2.2	Flange Plate Effective Width	223
10.3	Construction of Composite Floor Slabs	225
10.4	Limit Steel Ratio of Composite Floor Slabs	227
10.5	Design of Composite Floor Slabs	228
10.5.1	Design Loading	229
10.5.2	Bearing Capacity of Cross-Section	230
10.5.3	Calculation of Deflections	232
Chapter11	External Steel Concrete Structures	234

11.1	Experimental Study of Beams	235
11.1.1	Outline of Tests	235
11.1.2	Analysis of Test Results	235
11.2	Elastic Analysis of Beams	236
11.2.1	Characteristic of the Cross-Section	237
11.2.2	Stresses of the Cross-Section	237
11.3	Ultimate Strength of Beams	238
11.3.1	Flexural Strength	238
11.3.2	Shear Strength	240
11.4	Crack Width and Rigidity of Bending Members	240
11.4.1	Crack Width	240
11.4.2	Flexural Stiffness	241
11.5	Deflections of Beams	242
11.5.1	Transformed Area Methods	242
11.5.2	Effect of Slip on Deflection	243
11.6	Calculation of Columns Bearing Strength	246
11.6.1	Compressive Strength	246
11.6.2	Shear Strength	247
Chapter 12	Steel Reinforced Concrete Beams	249
12.1	Flexural Tests	249
12.2	Crack Strength	253
12.3	Flexural Strength	255
12.4	Calculation of Flexural Stiffness	261
12.4.1	Flexural Stiffness Based on Strain Compatibility Methods	261
12.4.2	Flexural Stiffness Based on Superposition Methods	265
12.4.3	Flexural Stiffness Based on Stiffness Reduction	266
12.5	Calculation of Deflections	266
12.6	Theoretical Calculating Formulas of Interface Slip	270
12.7	Shear Tests	272
12.7.1	Failure Modes and Deflections	272
12.7.2	Influence Factor of Shear Strength	274
12.8	Theoretical Calculation Formulas of Shear Strength	275
12.9	Practical Calculation Formulas of Shear Strength	280
12.9.1	Shear-Compression and Bending-Shear Failure Modes	281
12.9.2	Shear-Adhesive Failure Modes	283
12.9.3	Calculation of Shear Strength	284
12.10	Calculation of Crack Width	284

12. 10. 1	Vertical Crack Width	284
12. 10. 2	Oblique Crack Width	288
Chapter 13	Steel Reinforced Concrete Columns.....	290
13. 1	Axial Compressive Columns	290
13. 1. 1	Experimental Study	290
13. 1. 2	Calculation of Bearing Strength	293
13. 2	Experimental Study of Frame Columns	293
13. 3	Flexural Strength of Frame Columns	299
12. 3. 1	Calculation of Crack Loading	299
12. 3. 2	Calculation of Flexural Strength	300
13. 4	Shear Strength of Frame Columns	307
13. 4. 1	Calculation of Crack Strength	308
13. 4. 2	Calculation of Shear Strength	309
13. 5	Bearing Strength of Long-Columns	315
Chapter 14	Calculating Analysis of Steel Reinforced Concrete	317
14. 1	Full-range Analysis of Flexure Members	317
14. 1. 1	Combined Method Equation	317
14. 1. 2	Moment-Curvature Relationship	322
14. 1. 3	Load Versus Deflection	324
14. 2	Full-Range Analysis of Axial Compressive Member	326
14. 3	Full-Range Analysis of Compressive-Bending Member	327
14. 4	Full-Range Analysis of Eccentric-Compressive Member	329
14. 5	Nonlinear Finite Element Analysis	331
14. 5. 1	Unit Type	331
14. 5. 2	Plane Triangle Unit	331
14. 5. 3	Connecting Unit	334
14. 5. 4	Calculating Step	335
14. 5. 5	Analysis of Nonlinear Calculation	336
Chapter 15	Steel Reinforced Concrete Beam-Column Joints	339
15. 1	Experimental Study of Joints	339
15. 1. 1	Outline of Tests	339
15. 1. 2	Analysis of Test Results	340
15. 2	Crack Strength in the Area of Joint Core	348
15. 3	Shear Strength in the Area of Joint Core	350
Chapter 16	Steel Reinforced Concrete Shear Wall	357
16. 1	Construction of Shear Wall	357

16.2	Ultimate Strength of Shear Wall under Eccentric Compression	358
16.3	Ultimate Strength of Shear Wall under Eccentric Tension	362
16.4	Ultimate Strength of Shear Wall under Shear	363
16.5	Nonlinear Analysis of Shear Wall	366
16.5.1	Finite Element Model	366
16.5.2	Nonlinear Calculation Analysis Method	367
Chapter 17	Elastoplastic Analysis of Seismic Responses for Steel Reinforced Concrete Frame Structures	370
17.1	Remarks on Present Restoring Force Models	370
17.1.1	Previous Restoring Force Models	370
17.1.2	Characteristic of Hysteretic Curve	373
17.2	Mathematical Description of Restoring Force Model	374
17.3	Restoring Force Models of Steel Reinforced Concrete	376
17.3.1	Restoring Force Models Based on Experiments	376
17.3.2	Restoring Force Models Based on Numeric Algorithm	379
17.4	Calculating Mechanical Models	382
17.4.1	Previous Mechanics Models	382
17.4.2	Unit Rigidity Matrix	384
17.5	Analysis of Structural Matrix	393
17.6	Structure Dynamic Analysis Methods	394
17.7	Calculating Example	396
Chapter 18	Steel Tube Confined Concrete Structures	399
18.1	Axial Compressive Members	400
18.2	Axial Tension Members	405
18.3	Eccentric Compressive Members	405
18.4	Concrete Filled Rectangular Steel Tubular Columns	408
References		413

第 1 章 绪 论

从广义上讲,组合结构是由两种或两种以上材料组成的,能够共同受力、变形协调的结构。组合结构依据组成材料不同有诸多类型。本书主要介绍钢与混凝土组合结构,它是指利用型钢或用钢板焊接成钢骨架,再在其上、四周或内部浇注混凝土,使型钢与混凝土形成整体而共同受力、变形协调的结构。钢与混凝土组合结构通常分为五大类,即钢与混凝土组合梁、压型钢板混凝土组合楼板、钢筋混凝土结构、外包钢混凝土结构及钢管混凝土结构。钢与混凝土组合结构能充分发挥两种材料各自的优越性,克服各自的缺点,因此,它的工作性能比单一材料制成的结构更为优越,在土木工程中有着广阔的应用前景。

1.1 钢与混凝土组合梁

钢与混凝土组合梁是通过剪力连接件将钢梁与混凝土板连接起来而共同受力、变形协调的一种梁,这种梁既能充分利用钢所具有的优越抗拉性能和混凝土所具有的优越抗压性能,又能显著地提高梁的刚度和稳定性,其截面形式见图 1.1。

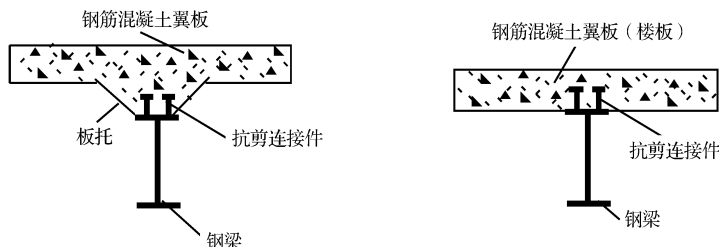


图 1.1 组合梁截面

(1) 钢与混凝土组合梁在国外的发展与研究

首次研究钢与混凝土组合梁始于 20 世纪 20 年代初,是加拿大 Dominion 桥梁公司的 Machay 等人,他们进行了 T 形简支组合梁的试验研究,同时,美国也做了相应研究,故意将工字钢翼缘两边剪齿成条状,或将钢梁上翼缘表面凿得凸凹不平,以增加其黏结力。20 世纪 30 年代末,英、法、德、瑞典等国家也对其进行了试验研究,并首次尝试用机械剪力连接件。随后,这些技术先进的国家,都制定了有关组合梁的设计规范或规程,在此期间组合梁设计理论逐渐得到完善。大约在 20 世纪 60 年代以前,基本上是按弹性理论分析组合梁,60 年代以后,则逐渐转入塑性理论分

析,重点是研究部分连接组合梁的工作性能。最近10年,国外一些学者主要研究了钢与混凝土预应力组合梁的受力性能,重点讨论了预应力钢筋类型、布筋方式、预应力钢筋含量及预应力大小等对结构静力行为的影响,低周期反复荷载下的组合梁工作性能,混凝土梁变效应对组合梁工作性能的影响,体外预应力组合梁非线性行为等。

在组合梁的应用与试验研究得到发展的同时,组合梁的理论研究也得到相应发展。20世纪初,E. S. Andress 首先提出换算截面理论,将组合梁看成一个整体,首先将组合截面换算成同一材料的截面,然后根据初等弯曲理论进行截面计算和设计,这种理论物理意义明确,计算简便,适用于组合梁弹性工作阶段的应力和刚度计算,但由于没有考虑交接面相对滑移对组合梁的影响,理论分析与实际受力情况存在一定差距。大约在20世纪50年代,N. M. Nemark 第一个考虑了交接面相对滑移对组合梁承载力和变形的影响,建立了比较完善的“不完全交互作用”理论,在理论公式推导过程中利用了复杂的微分方程,理论公式比较复杂,不便于实际应用,但考虑了交接面滑移效应,具有重要理论意义。大约在20世纪60年代初期,Lehigh 大学的Tharliman 对极限强度理论在组合梁中应用的可行性进行了一系列试验研究,研究结果表明,当组合梁达到极限承载力时,中和轴通常在混凝土翼缘板内,并认为钢梁的全截面均已达到了抗拉屈服强度,这种理论简便适用,目前已在各国规范中采用。

(2) 钢与混凝土组合梁在国外的应用

最早的组合结构规范大多属于桥梁结构,国外在很多大跨度桥梁中采用了钢与混凝土组合梁。苏联于1944年建成了第一座组合公路桥;瑞典于1955年建成跨径为182m的斯曹松特桥;德国于1956年建成跨径为58.8m的比歇瑙尔桥;日本分别于1960年和1975年建成跨径为128m的腾濑桥和跨径为83m的大阪大和桥,日本自1959年制定规范后,便有80%公路钢桥改为组合式桥;英国于1964年建成跨径为152m的新港桥;美国分别于1971年、1976年、1984年、1988年建成了跨径为137m的锡卡特港桥、跨径为54m的萨克拉门托河桥、跨径为274m的昆西桥、跨径为250m的威顿桥;加拿大于1986年建成跨径为465m的安纳西斯桥等均采用了钢与混凝土组合梁。可见,钢与混凝土组合梁在国外桥梁中得到广泛的应用。

(3) 钢与混凝土组合梁在国内的研究

我国对钢与混凝土组合梁的研究相对国外比较晚。大约在20世纪80年代初期,主要以试验研究和理论分析为主,包括研究简支组合梁的抗弯承载力、刚度、滑移效应等;研究栓钉、槽钢、弯筋及方钢剪力连接件在普通(轻骨料、高强)混凝土中的工作性能,探讨了其破坏形态、极限承载力、荷载与滑移关系等;研究了钢与混凝土连续组合梁的性能,探讨了塑性内力重分布规律、负弯区的承载力和裂缝宽度及钢梁局部稳定性等问题。近10年,我国许多研究单位又进行了钢与高强混凝土组合梁工作性能、钢与混凝土预应力组合梁的工作性能及组合梁的非线性性能等

研究。

(4) 钢与混凝土组合梁在国内的应用

20 世纪60 年代初,我国已将钢与混凝土组合梁应用于工业与民用建筑及桥梁中,如横山钢铁厂电炉平台(节约钢材 20%),现已使用近 40 年;唐山陡河电厂采用的平台组合梁经受了地震的考验;四川峨嵋铁合金厂四车间窑头平台梁,由于检修设备的需要,需将梁高减少 200mm,选用钢与混凝土组合梁后,问题得到顺利解决;太原第一热电厂五期工程,组合楼层选用叠合板组合梁;北京国际技术培训中心的两幢 18 层塔楼,楼盖结构采用冷弯薄壁型钢与混凝土简支组合梁;沈阳红阳二井井塔采用了钢与混凝土组合梁,成功地解决了井塔抗震问题;承德钢厂采用了 18m 跨的钢与混凝土组合吊车梁,比全钢吊车梁节省钢材 20% 左右;北京西客站主楼采用预应力钢-混凝土组合梁和预应力钢桁架;武汉长江大桥,上层公路桥的纵梁与公路面混凝土板采用背贴背的 T 形连接件铆在纵梁上;在京广线信阳站附近十字江上架设了 32m 跨径的简支组合板梁桥;在山西阳泉附近建成一座跨径为 48m 的简支组合板桥;1993 年建成的北京国贸桥,三个主跨采用了钢与混凝土叠合板连续组合梁;分别于 1991 年和 1993 年建成的跨径为 423m 的上海南浦大桥和路径为 602m 的杨浦大桥均是采用钢与混凝土组合梁的斜拉桥;2000 年建成的芜湖长江大桥,其主跨 672m,是目前世界上规模最大的公路、铁路两用桥,此桥是采用了预应力混凝土板与钢桁架组合梁的斜拉桥。

1.2 压型钢板混凝土组合楼板

压型钢板混凝土组合楼板是在带有各种形式的凹凸肋或各种形式槽纹的钢板上浇注混凝土而制成的组合楼板,它是依靠各种凹凸肋或各种形式的槽纹将钢板与混凝土连接到一起。压型钢板既可作为后浇混凝土的模板,又可作为组合楼板的受力钢筋,其截面形式见图 1.2。

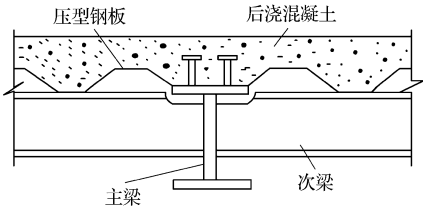


图 1.2 组合楼板截面

压型钢板混凝土组合楼板是通过剪力连接件与钢梁连接起来,形成整体而共同受力和协调变形的一种新型组合楼板体系。在这种组合楼板体系中,钢板除在施工阶段做模板用外,在使用阶段还兼做混凝土组合楼板的受力钢筋或部分受力钢

筋,钢梁则是钢框架结构中的主梁或次梁。这种结构是多层、高层钢结构房屋非常重要的组成部分之一,是钢结构建筑楼板体系不可缺少的配套技术,它能够充分利用钢材所具有的优越抗拉性能和混凝土所具有的优越抗压性能,具有自重轻、塑性和抗震性能好、施工简便而迅速和经济效果显著等突出优点,有着广阔的应用前景。

国外自20世纪60年代就开始对压型钢板混凝土组合楼板进行研究,研究了压型钢板普通(轻骨料)混凝土组合楼板的抗弯、抗剪及耐火等工作性能,研究成果已被许多国家纳入设计规范或规程。美国AISC规范(1978)、加拿大CSA(1978)规范、澳大利亚AS 2327-Part2-1980规范及欧洲组合结构规程EC-4等都设有压型钢板混凝土组合楼板的条文,并且,已建成一批压型钢板混凝土组合楼板体系,取得了良好的经济效益和社会效益。

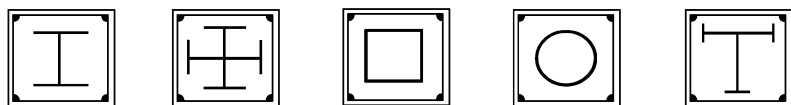
我国对压型钢板混凝土组合楼板的研究比较晚,主要是因为过去我国钢材产量较低,薄卷板材尤为紧缺,成型的压型钢板与连接件等配套技术未得到开发所致。20世纪80年代,我国对压型钢板混凝土组合楼板的基本性能进行了研究,如1985年冶金部建筑研究总院对压型钢板与浮石混凝土组合楼板的组合效应进行了研究;1992年哈尔滨建筑大学进行了压型钢板混凝土组合楼板性能研究,给出了组合楼板的挠曲变形实用计算公式;1998年北京市建筑设计研究院进行了压型钢板混凝土组合楼板的耐火性能的试验研究,研究了组合楼板在一定时间内的耐火时限中的变温和变形发展规律;2000年哈尔滨建筑大学进行了组合楼板的耐火性能的研究,应用有限元法分析了组合板的温度场,分析影响组合板耐火极限的参数等。我国目前已建成一批采用组合楼板的大跨结构、高耸建筑等,如上海锦江饭店、静安饭店,深圳发展中心大厦,北京香格里拉饭店、京城大厦、长富宫中心,沈阳市汽车城、沈阳浑河商品交易市场博览及演艺中心等都采用钢与压型钢板混凝土组合楼板体系。可见,压型钢板混凝土组合楼板在我国的建筑业中有着广阔的应用前景。

1.3 钢骨混凝土结构

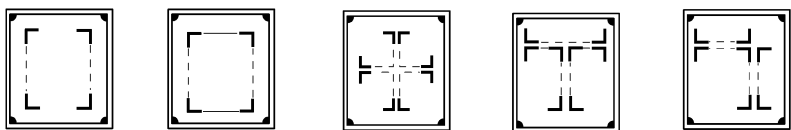
钢骨混凝土(SRC)结构是在钢筋混凝土内部埋置型钢或焊接钢构件而形成的结构。它可以是梁、柱、板墙等组合构件,埋置的焊接钢构件可以是实腹式工字钢,也可以是格构式的钢构件,这种结构使钢骨与混凝土各自强度得到提高,特别是由于钢骨的存在,改善了结构或构件的延性,提高了结构的抗震能力,其截面形式见图1.3。

(1) SRC 结构在国外的研究

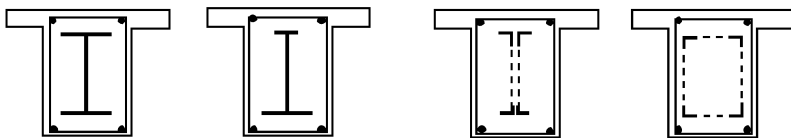
钢骨混凝土结构在不同国家有不同的叫法,日本称之为钢骨钢筋混凝土结构,美国等西方国家称之为混凝土包钢结构,前苏联称之为劲性钢筋混凝土结构。欧美



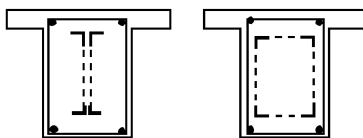
(a) 实腹式钢骨混凝土柱



(b) 空腹式钢骨混凝土柱



(c) 实腹式钢骨混凝土梁



(d) 空腹式钢骨混凝土梁

图 1.3 钢骨混凝土结构构件截面

于本世纪初就开始对SRC 结构进行研究,而对SRC 结构进行大量研究是从20 世纪50 年代开始的。很多学者在计算模型、计算和分析方法及简化计算等方面做了大量工作,提出了许多风格各异、适合本国实情的理论和方法。

日本特别重视SRC 结构抗震性能的研究和工程应用。1950 年日本公布的建筑基本法,作为建筑行政指导方针,要求6 层以上的建筑物采用SRC 结构。1953 年要求7 层以上、1970 年要求8 层以上建筑物采用SRC 结构。在日本,SRC 结构和木结构、钢结构及钢筋混凝土结构并列为四大结构,到1985 年,SRC 结构的建筑面积占总建筑面积的62.8%,10~15 层高层建筑中SRC 结构的建筑物幢数占总数的90%左右。日本对SRC 结构进行广泛研究是从第二次世界大战后开始的,在战后的修复中,SRC 结构建筑物不断涌现,由于建立设计方法的需要,促进了对结构体系的系统研究。1951~1956 年,日本主要研究了SRC 梁的抗弯性能、SRC 柱的偏压性能、SRC 梁和柱的剪切性能、SRC 梁柱节点抗剪性能及钢骨与混凝土的粘结性能等,取得了可喜的研究成果,并以这些研究成果为基础,日本建筑学会于1958 年制定了以累加强度为基本体系的《钢骨混凝土规范》。到20 世纪60 年代,在一次地震中发现许多钢筋混凝土柱发生了剪切破坏,而SRC 结构的损坏极其轻微,由此促进了对SRC 构件的剪切性能的进一步研究,并取得了防止剪切破坏的措施。1963 年,日本对1958 年《钢骨混凝土规范》进行了第一次修订,修订后的内容与第一版基本相同,只是对有关剪力计算条文给出了具体的计算公式,并在柱子部分的说明中给出了钢骨和钢筋为非对称配置时的累加强度计算公式。1970 年以后,日本又一次掀起了对SRC 结构的研究热潮,研究重点是构件达到最大强度后的延性及滞

回特性等。1975 年又一次对《钢筋混凝土规范》进行了较大的修订,修订后的规范要求停止使用延性较差的空腹式钢骨,并建议采用实腹式钢骨。

英、美等国家大约在一个世纪以前,就在钢筋混凝土技术中使用了 SRC 结构,主要应用于桥梁结构中。经过多年的试验研究和理论分析,20 世纪 60 年代初,英国改进了 SRC 柱的设计方法,Bondal 在帝国学院做了一系列试验后,提出了描述柱子工作性能的强度理论;Basu 进行了设计方法的理论研究,于 1967 年出版了理论分析资料,对不同截面不同长细比的 SRC 柱进行大量试验,发现这些柱子的工作性能可以通过轴向荷载稳定系数及由长细比、截面特性及荷载所决定的系数来实现。大约在 70 年代中期,英国一些学者通过试验和理论分析,证明了利用纯钢柱的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。对 SRC 梁,英国钢结构规范按组合截面进行弹性设计,即取 0.7 倍型钢屈服强度按弹性方法计算型钢,然后按组合截面进行修正,忽略混凝土抗拉强度。欧洲共同体组织(ECCS-CEB-FIP-IABSE)建议将 SRC 梁按照钢骨腹板以及受压翼缘的钢板是否具有足够的刚度划分为密实截面和纤细截面。对密实截面梁的正负抵抗弯矩可以简化为塑性理论计算,对纤细截面梁的正负抵抗弯矩可以按弹性理论设计。

SRC 结构在前苏联的应用也比较广泛,多数还是用于超高层建筑的框架结构中。以其代表的极限强度理论,认为钢骨与混凝土是完全共同作用,并且在极限荷载下钢骨完全屈服。1951 年电子建设部颁布了 SRC 结构设计规范,主要涉及空腹式 SRC 梁和柱及其形成的框架结构的设计规定。1978 年又出版了 SRC 结构的设计指南 CH 3—78。主要以实腹式为主要内容,并强调了纵筋和箍筋的作用。对 SRC 梁的正截面计算同样根据中和轴与型钢的相对位置,即中和轴经过型钢腹板、不经过型钢和经过型钢翼缘三种情况而定。

(2) SRC 结构在国内的应用与研究

1) SRC 结构的研究。为了研究 SRC 结构的受力性能,我国许多科研单位在国外研究基础上,先后进行了 SRC 梁的抗裂、抗弯、抗剪性能及刚度等研究,进行了 SRC 构件的轴心受压、偏心受压性能研究,进行了 SRC 边节点、十字形节点及顶层边柱节点的受力机理、抗剪能力、抗震性能研究;进行了 SRC 剪力墙的工作机理、破坏过程、抗剪强度及抗震性能研究。最近,同济大学和东北大学等又进行了钢骨高强混凝土结构的工作性能研究,已取得了初步研究成果。

2) SRC 结构在我国的应用。我国于 20 世纪 50 年代从苏联引进了 SRC 结构,并在工业厂房中应用了 SRC 结构,后来由于片面追求节约钢材,这种结构几乎停止使用,80 年代后期,随着我国建筑业的迅猛发展,SRC 结构又一次在我国兴起,特别是在最近 10 年中,我国兴建了很多 SRC 结构高层建筑,如 1995 年建成的北京香格里拉饭店,地上 24 层,高度 83m;1992 年建成的深圳八一大楼,地上 81 层,高度 288m;1993 年建成的上海浦东国际金融大厦,地上 53 层,高度 221m;1994 年建成

的上海世界金融大厦,地上43层,高度174m;1998年建成的广州汽车大厦,地上40层,高度175m。此外还有沈阳富林广场大厦,地上30层,高度99m;陕西信息大厦,地上52层,高度189m;上海环球金融中心大厦,地上95层,高度460m;南宁宝都大厦,地上主楼48层,高度179m;海口金融大厦,地上主楼48层,高度169m;香港中环东北大楼,地上主楼88层,高度420m;上海金茂大厦,地上主楼88层,建筑总高度421m;中国台北国际金融大厦,地上主楼101层,建筑总高度为448m。以上高层建筑均采用了钢筋混凝土结构,但总的来说,同国外相比应用相差较远,如日本6层以上的建筑物中采用SRC结构的建筑面积占总建筑面积的62.8%,而我国SRC结构占总建筑面积不足千分之一。

1.4 外包钢混凝土结构

外包钢混凝土结构是在钢筋混凝土构件外侧包有钢板或角钢的结构。外包钢混凝土结构是为满足大中型工业厂房内悬挂复杂的各类管网和线路要求而形成的组合结构,它也有利于克服装配式钢筋混凝土构件在吊运、安装过程中棱角易破损等缺点,其截面形式见图1.4。

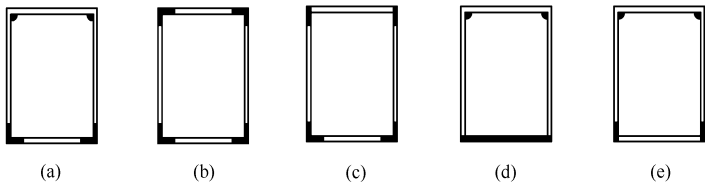


图1.4 外包钢混凝土结构构件截面

(1) 外包钢混凝土结构在国外的应用与研究

1970年前苏联首先在基辅第五热电厂主厂房框架中使用了外包钢混凝土结构,随后在乌格列戈尔等几个电厂工程中也使用外包钢混凝土结构。1977年,莫斯科建筑工程学院完成一个锻造修理车间的设计,其外包钢双肢柱由钢板连接而成,屋架的受压杆采用外包钢混凝土。同时,前苏联开始对外包钢混凝土结构工作性能进行研究,主要研究了外包角钢与混凝土共同作用问题、横向钢筋与角钢的焊接形式、横向钢筋对核心混凝土约束问题、构件的抗弯(压)承载力、构件连接接头的变形与承载能力等。研究表明,外包钢混凝土构件中角钢与混凝土整体受力性能良好,构件连接接头具有足够的可靠性,杆件组成的双肢柱可以按框架体系进行计算。国外已将研究成果应用到实际工程中去,取得了良好的技术经济效益。

(2) 外包钢混凝土结构在国内的应用与研究

我国大约在20世纪70年代开始从国外引进外包钢混凝土结构应用技术,提出在电厂的结构体系中采用外包钢混凝土结构,并结合实际工程,对低配筋率的梁、

柱及构件连接接头等进行了试验研究,在此基础上开始试点应用。据不完全统计,国内先后已有电力、石油、轻工及冶金等部门约二十多个工程采用了外包钢混凝土结构,如吉林造纸厂碱炉工程采用了外包钢混凝土柱;河南姚孟发电厂采用了外包钢混凝土梁;东北清河电厂四期工程、北京毛纺动力厂工程、天津第一发电厂改建工程、沙岭电站工程及湖南金城造纸厂自备电站均采用外包钢混凝土梁与柱。同时,我国的科研单位也开始了外包钢混凝土构件的抗剪、抗弯、抗压、延性及框架结点的受力性能研究,已取得良好的研究成果。

1.5 钢管混凝土结构

钢管混凝土结构是在钢管中充填混凝土而形成的结构,按截面形式不同,分为方钢管混凝土、圆钢管混凝土和多边形钢管混凝土结构。钢管混凝土结构因具有良好的力学性能和施工简捷等特点,近年来在国内外得到广泛的应用,其截面形式见图 1.5。

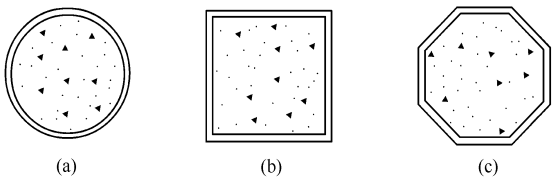


图 1.5 钢管混凝土结构构件的截面

(1) 钢管混凝土结构在国外的应用与研究

钢管混凝土结构在土木工程中的应用已有 100 年的历史,由于钢管混凝土结构力学性能优越,在国外已得到工程界和研究机构的普遍重视。在 20 世纪 60 年代以前,国外很多国家进行了钢管混凝土结构的基本力学性能的试验研究,阐明了钢管套箍混凝土的工作机理,并成功地用平衡法推导出钢管混凝土轴压短柱极限承载力的理论计算公式,为钢管混凝土结构的设计计算理论奠定了坚实的基础。在 20 世纪 60 年代后期,钢管混凝土结构技术在苏联、西欧、北美及日本等工业发达国家受到重视,开展了钢管混凝土轴压和偏压柱的试验和理论研究,取得了可喜的研究成果,并将部分成果成功地应用于厂房建筑、多层建筑及立交桥等工程中。20 世纪 80 年代后期,随着混凝土泵送工艺的发展和高强混凝土的出现,钢管高强混凝土结构得到更多的应用,对其工作性能的研究日益增多,并逐渐在高层、超高层建筑中得到广泛应用。如 1989 年在美国西雅图市建成的联盟广场大厦,地面以上 56 层,高度为 226m,采用钢管混凝土柱;1990 年在美国西雅图市建成的太平洋第一中心大厦,地面以上 44 层,高度为 165m,采用钢管混凝土框架-支撑体系;1991 年在澳大利亚墨尔本市建成的联邦中心大厦,地上 46 层,主体结构采用钢管混凝土柱与

钢梁结构体系;1994年在日本大阪市建成的奇艾思大厦办公楼,地上22层,高101m,大厦主体结构采用由钢管混凝土柱与钢梁组成的框架体系;1998年在日本埼玉县川口市建成的爱尔莎塔楼高层公寓,采用钢管混凝土柱与钢筋混凝土梁组成的框筒体系。

(2) 钢管混凝土结构在我国的应用与研究

我国研究和应用钢管混凝土结构已有40多年的历史,从1963年开始,我国许多科研单位对钢管混凝土基本构件的工作性能、设计方法、节点构造和施工技术 etc 开展了比较系统的研究,20世纪60年代,开始在一些厂房和地铁等工程中采用了钢管混凝土柱。20世纪70年代,钢管混凝土结构技术又在冶金、造船、电力等行业中的单层厂房和重型构架中得到成功的应用,在此期间主要进行了钢管混凝土结构的基本性能的试验研究。从20世纪80年代以后的10年中,我国已建立了一套能够满足钢管混凝土结构的计算理论和设计方法,并研究了钢管高强混凝土结构的基本力学性能。最近10年,国家经济迅猛发展,钢管混凝土结构的研究和应用得到进一步重视,主要研究了钢管混凝土结构的组合材料本构模型,钢管混凝土的轴心受压(拉)、抗弯、抗剪、压弯、压扭、弯扭、局部承压等力学性能,钢管高强混凝土柱的力学性能,火灾下和高温后钢管混凝土结构的力学性能等,并很快将其应用到大跨度桥梁和高层建筑中。如1990年在四川省旺苍县建成我国第一座跨度为115m的钢管混凝土拱桥。据不完全统计,到目前已建成120多座钢管混凝土桥,其发展速度之快,为中外建桥史上所罕见,尤其是重庆市万县长江公路大桥跨度达420m,一跨过江,成为当今混凝土大跨度拱桥世界之最。在高层建筑中,全国已有20多座高层建筑中采用钢管混凝土结构,如1990年建成的泉州市邮电局大楼,地上15层,高87.5m;1994年建成的厦门阜康大厦,地上25层,高87m;1996年建成的广州好世界广场大厦,地上33层,高116m,深圳地王商业大厦,地上79层,高325m;1997年建成的福建南安邮电大厦,地上28层,高99m,厦门金源大厦,地上28层,高96m,福州环球广场大厦,地上32层,高99m,天津晚报大厦,地上38层,高137m,台湾高雄国际广场大厦,地上85层,高342m;1998年建成的北京世界金融中心大厦,地上33层,高120m,广州冠军大厦,地上38层,高140m,珠海华银广场大厦,地上30层,高99.6m;1999年在广州建成的广州新中国大厦,地上51层,高201.8m,广州南方航空大厦,地上61层,高189m,深圳塞格广场大厦,地上72层,高292m,沈阳专网局大楼,地上13层,高87.5m;2000年建成的广州新达成广场大厦,地上30层,高100m,广州合银广场大厦,地上56层,高208m;2001年动工兴建的中福城高层住宅,地上18层,高60m,这些高层建筑均不同程度采用了钢管混凝土结构,可见,钢管混凝土结构在我国应用之广。

第2章 组合材料强度准则及本构关系

在钢与混凝土组合结构的计算分析中,建立合理的材料本构关系和材料强度破坏准则是两个关键性的问题。组合材料的本构关系对钢与混凝土组合结构的计算结果有重大影响,如果所采用的材料本构关系不能很好地反映材料的各项力学性能,那么计算再精确也无法反映结构的实际受力特征。材料的强度准则应尽可能地概括不同受力状态下材料的强度破坏条件。经过多年的研究,混凝土的强度准则从一参数增至五参数,为了能对混凝土的强度性能进行更好、更广泛的描述,强度准则的参数有越来越多的趋势。本章主要介绍混凝土的强度破坏准则、混凝土的本构关系、钢材的本构关系及钢与混凝土组合材料的本构关系。

2.1 混凝土强度准则

混凝土是一种复合多相材料,其内部结构非常复杂,国内外许多学者已研究其破坏理论多年,在相当长的时间内,研究者们所提出的混凝土破坏机理的理论建议,相互之间具有较大差别,而且没有一种理论能够适用于普遍情况。然而,近20年来,大量问题已基本搞清楚,为提出一致破坏理论跨出了重大一步。

在将混凝土破坏准则公式化之前,首先应该将混凝土的破坏给予确切的定义。多年来人们采用了不同定义形式,如材料屈服、承载能力、开裂及过大变形等,具有代表性的破坏概念可定义为:混凝土不再能维持它承载能力的应力或应变状态。一般来说,混凝土的破坏可以分为受拉和受压破坏,受压破坏一般以延性为特征,破坏时混凝土内部出现很多微小裂缝,混凝土在各个方向丧失其强度。受拉破坏一般以脆性为特征,破坏时混凝土产生较大裂缝,混凝土在垂直裂缝方向丧失抗拉能力。本节将分别讨论混凝土的单轴、双轴及多轴破坏理论。

2.1.1 单向受力破坏准则

国内外众多学者对混凝土的单轴破坏准则定义基本上达成共识,对混凝土的单轴受压破坏条件可以取混凝土极限应变达到 $0.003 \sim 0.004$ 为准,而对混凝土的单轴抗拉破坏条件可以取其抗拉应力达到其抗拉极限强度。

2.1.2 双向受力破坏准则

混凝土在双向应力状态下,两个主应力方向呈现出不同的本构关系,两个应力是互相影响的,并且影响着混凝土内部裂缝的形成和发展,从而影响到另一方的强

度。因此,混凝土在双向应力状态下,其破坏模式是多种多样的,下面介绍几个具有代表性的破坏准则。

1. Darwin 和 Pecknold 模式

Darwin 和 Pecknold 认为混凝土在二维应力空间的破坏条件可采用二维破坏包络线,见图2.1。混凝土的应力一旦超出包络线 $ABCDEF$,就发生破坏。在 AB 、 AF 段为拉断,在 CDE 段为压碎,在 BC 、 EF 段为拉断向压碎过渡, E 、 C 点的值为1。可以看出,抗拉强度不受另一方的抗拉强度的影响,而随另一方向的压应力增加而减小,双向受压时抗压强度增加。

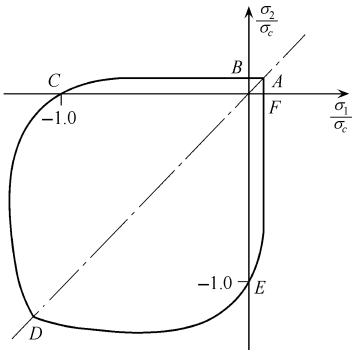


图2.1 二维平面破坏包络线

1) 双向受压。

$$\left[\frac{\sigma_1}{f_c} + \frac{\sigma_2}{f_c} \right]^2 - \frac{\sigma_2}{f_c} - 3.65 \frac{\sigma_1}{f_c} = 0 \quad (2.1.1a)$$

或

$$\sigma_2 \leq \sigma_c = \frac{1 + 3.65\alpha}{(1 + \alpha)^2} f_c \quad (2.1.1b)$$

$$\sigma_1 \leq \sigma_c = \alpha \sigma_c \quad (2.1.1c)$$

2) 一向受拉,一向受压。当 $\alpha \leq -0.308$ 时,

$$\sigma_1 \geq f_t \quad (2.1.2a)$$

当 $\alpha \geq -0.308$ 时,

$$\sigma_1 \geq \left[1 - 0.8 \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right] f_t \quad (2.1.2b)$$

$$\sigma_2 \leq \sigma_c = \frac{1 + 3.28\alpha}{(1 + \alpha)^2} f_c \quad (2.1.2c)$$

3) 双向受拉。

$$\sigma_1 \geq f_t \quad (2.1.3a)$$

或

$$\sigma_2 \geq f_t \quad (2.1.3b)$$

式中 $\alpha = \sigma_1 / \sigma_2$;

σ_1 、 σ_2 ——分别为两个方向主应力;

σ_c 、 σ_c ——分别为两个方向的最大压应力;

f_c ——混凝土的单轴抗压强度;

f_t ——混凝土的单轴抗拉强度。