

# 钢与混凝土组合结构 理论与计算

◎ 王连广 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 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、钢筋混凝土结构构件(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  
ISBN7-03-014615-8

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. TU375

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>

源海印刷有限责任公司印刷

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生导师刘之洋教授、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

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....            | 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 钢筋混凝土结构 .....                | 4  |
| 1.4 外包钢混凝土结构 .....               | 7  |
| 1.5 钢管混凝土结构 .....                | 8  |
| <b>第 2 章 组合材料强度准则及本构关系</b> ..... | 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 |
| <b>第 3 章 钢与混凝土组合梁</b> .....      | 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         |
| <b>第4章 钢与混凝土预应力组合梁 .....</b> | <b>84</b>  |
| 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        |
| <b>第5章 组合梁徐变效应分析 .....</b>   | <b>114</b> |
| 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        |
| <b>第6章 钢板与混凝土组合梁 .....</b>    | <b>141</b> |
| 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        |
| <b>第7章 剪力连接件设计 .....</b>      | <b>160</b> |
| 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        |
| <b>第8章 钢与混凝土组合梁计算分析 .....</b> | <b>178</b> |
| 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        |
| <b>第9章</b>  | <b>钢桁架与混凝土组合梁计算分析 .....</b> | <b>206</b> |
| 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        |
| <b>第10章</b> | <b>压型钢板混凝土组合楼板 .....</b>    | <b>220</b> |
| 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        |
| <b>第11章</b> | <b>外包钢混凝土结构 .....</b>       | <b>234</b> |
| 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 |
| <b>第 12 章 钢骨混凝土梁</b> ..... | 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 |
| <b>第 13 章 钢骨混凝土柱</b> ..... | 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        |
| <b>第 14 章 钢骨混凝土结构构件计算分析 .....</b> | <b>317</b> |
| 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        |
| <b>第 15 章 钢骨混凝土结构梁柱节点 .....</b>   | <b>339</b> |
| 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        |
| <b>第 16 章 钢骨混凝土剪力墙 .....</b>      | <b>357</b> |
| 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        |
| <b>第 17 章 钢骨混凝土框架结构弹塑性地震反应分析 .....</b> | <b>370</b> |
| 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 钢骨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        |
| <b>第 18 章 钢管混凝土结构 .....</b>            | <b>399</b> |
| 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        |
| <b>参考文献 .....</b>                      | <b>413</b> |

# CONTENTS

## Foreword

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapter 1 Introduction</b>                                                      | 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  |
| <b>Chapter 2 Strength Criterion and Constitutive Models of Composite Materials</b> | 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 |
| <b>Chapter 3 Composite Beams of Steel and Concrete</b>                             | 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         |
| <b>Chapter 4</b> | <b>Prestressed Composite Beams of Steel and Concrete .....</b> | <b>84</b>  |
| 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        |
| <b>Chapter 5</b> | <b>Creep Effects in Composite Beams .....</b>                  | <b>114</b> |
| 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<br>..... | 138        |
| 5.3.2            | Internal Force and Deflection Versus Time Relationship<br>.....              | 139        |
| <b>Chapter 6</b> | <b>Composite Beams of Steel Plate and Concrete .....</b>                     | <b>141</b> |
| 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        |
| <b>Chapter 7</b> | <b>Design Method of Shear Connectors .....</b>                               | <b>160</b> |
| 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        |



|                   |                                                                         |     |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Chapter 8</b>  | <b>Calculating Analysis of Composite Beams</b>                          | 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 |
| <b>Chapter 9</b>  | <b>Calculating Analysis of Steel Truss and Concrete Composite Beams</b> |     |
|                   |                                                                         | 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 |
| <b>Chapter 10</b> | <b>Composite Floor Slabs of Profiled Steel Sheeting and Concrete</b>    |     |
|                   |                                                                         | 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 |
| <b>Chapter 11</b> | <b>External Steel Concrete Structures</b>                               | 234 |