

土木工程研究生系列教材

高等钢筋混凝土 结构学

赵国藩 主 编
周 氏 主 审

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



● ISBN 7-111-16847-X/TU·759(课)

封面设计 / 电脑制作
张静

土木工程研究生系列教材

书名	作者	主审
结构动力学	刘晶波 等	欧进萍
地震工程学	李宏男 等	林 皋
高等土力学	卢廷浩 等	殷宗泽
大跨空间结构	张毅刚 等	沈世钊
高等工程地质学	赵树德 等	朱博鸿
高等岩石力学	刘宝琛 等	蔡美峰
土工合成材料	王 钊	王正宏
防灾减灾工程学	江见鲸 等	任爱珠
高等基础工程学	郑 刚 等	顾晓鲁
高等钢结构理论	张耀春 等	钟善桐
岩土工程数值分析	廖红建 等	刘怀恒
高等钢筋混凝土结构学	赵国藩 等	周 氏

ISBN 7-111-16847-X



9 787111 168478 >

定价: 38.00 元

地址: 北京市百万庄大街22号

邮政编码: 100037

联系电话: (010) 68326294

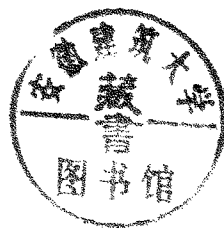
网址: <http://www.cmpbook.com>

E-mail: online@cmpbook.com

土木工程研究生系列教材

高等钢筋混凝土结构学

主 编 赵国藩
副主编 王清湘 宋玉普
参 编 吴胜兴 康清梁 康谷贻
 王铁成 黄承逵 柳炳康
主 审 周 氏



机械工业出版社

本书共 13 章。主要内容为钢筋混凝土结构的新材料、新结构、新的试验技术, 钢筋混凝土结构的可靠度设计理论, 混凝土的本构关系和破坏准则, 钢筋混凝土结构有限元分析, 正截面承载力计算, 斜截面受剪承载力计算, 扭曲截面承载力计算, 裂缝控制及耐久性设计, 预应力混凝土结构, 钢筋混凝土构件的延性与抗震, 高性能混凝土和纤维增强混凝土性能和结构设计理论, 钢—混凝土组合结构的性能和设计理论。

本书是高等学校土木、水利、交通、海洋等工程专业硕士研究生和博士研究生的教材或教学参考书, 也可供从事钢筋混凝土结构工程的设计、施工人员和科学研究者参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

高等钢筋混凝土结构学/赵国藩主编. —北京: 机械工业出版社, 2005.8
(土木工程研究生系列教材)
ISBN 7-111-16847-X

I. 高… II. 赵… III. 钢筋混凝土结构—研究生—教材 IV. TU375

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 073108 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 季顺利 版式设计: 霍永明 责任校对: 程俊巧
封面设计: 张 静 责任印制: 洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2005 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷
1000mm × 1400mm B5 · 17.125 印张 · 665 千字
定价: 38.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68326294
封面无防伪标均为盗版

土木工程研究生系列教材编审委员会

顾问: (以姓氏笔画为序)

王正宏	任爱珠	朱博鸿	刘宝琛
刘祖德	刘怀恒	沈世钊	沈祖炎
陈英俊	林 皋	欧进萍	周 氏
周锡元	赵国藩	钟善桐	殷宗泽
顾晓鲁	蔡美峰		

主任委员: 江见鲸

副主任委员: (以姓氏笔画为序)

李宏男	李 奇	李爱群	朱合华
杜修力	陈云敏	张永兴	张素梅
尚守平	姜忻良	夏 禾	徐志胜
廖红建			

委员: (以姓氏笔画为序)

卫 军	王 钊	王清湘	卢廷浩
朱召泉	刘晶波	李正良	李英民
李洪泉	李鸿晶	杨果林	吴知丰
陈国兴	张家生	张毅刚	张耀春
郑 刚	易伟建	单 建	周朝阳
赵树德	徐礼华	袁迎曙	康清良
盛宏玉			

秘书长: 季顺利

土木工程研究生系列教材序

随着我国高等教育的发展,普通本科教育已由精英式教育发展成为大众式教育。我国科学技术的高速发展,对具有高级专业知识、高级专业技能的专门人才的需求,日益迫切,这为硕士研究生教育的发展提供了广阔空间。一些高等院校,硕士研究生的招生规模,近年来正以每年增加15%~30%的速度发展。对一些研究型的重点高校,在“十五”期间,本科生与研究生的招生比例要大致相当。许多高校已获得工程硕士的培养授权,这为研究生培养又开辟了新途径。

硕士研究生招生规模的扩大,对传统的研究生教育模式提出了挑战。过去硕士生的培养基本套用博士生的培养模式,主要靠传帮带式的教育模式,而对数量增大的研究生教育,必须建立整建制的培养模式,即要求硕士研究生的教育培养模式向公共化、规范化方向发展。对此,硕士研究生的教材,特别是研究生教育的平台课、学位课的教材建设就显得特别重要了。

机械工业出版社根据当前土木工程研究生教育发展现状,本着“大土木工程”的教育思想,组织国内部分高校土木工程专业的教授,对土木工程研究生用教材建设进行了研讨,并组织编写了土木工程研究生系列教材。为保证教材的编写质量,组织成立了教材编审委员会,聘请了一批学术造诣深、德高望重的专家作顾问和教材主审。本套系列教材编写、出版的思路是:先基础课、平台课教材,后专业课教材。本套教材由长期给研究生授课的老师合作编写,达到“学校优势互补,质量上乘”的目标。教材体系设计,本着“重基本理论、重学科发展,结合学生现状和人才培养要求”的原则。教材编写质量,本着“出精品、主编负责、主审把关”的原则,符合国务院学位委员会设定的专业要求。

本套系列教材将于2005年陆续出版。我们相信,本套系列教材的出版将对我国土木工程研究生教育的发展和教学质量的提高及人才培养,产生积极作用,为我国经济建设和社会发展作出贡献。

王见鲸

前 言

本书是为高等学校土木、水利、交通、海洋等工程专业硕士研究生和博士研究生编写的教材或教学参考书。本书各章作者均为长期从事研究生《高等钢筋混凝土结构学》的主讲教师，具有丰富的教学经验。

书稿内容反映了我国当前高等钢筋混凝土结构学的水平。本书共分 13 章：

第 1 章绪论，对国内外近年来钢筋混凝土结构的发展，从新材料、新结构、新计算理论、耐久性、已建结构的鉴定、加固以及新试验技术等方面给予简要介绍。

第 2 章钢筋混凝土结构可靠度设计理论，介绍了工程结构设计中影响工程结构可靠性的事物不确定性和可靠性近年来研究概况，结构随机可靠度分析的基本概念和方法，可靠度近似计算的一次二阶矩法以及今后需要继续研究的问题。

第 3 章普通混凝土的本构关系和破坏准则，介绍了复杂应力状态下混凝土的变形和强度特性，并在此基础上介绍了国内外目前比较成熟的应用较广的混凝土的破坏准则和本构关系。这些模型可用于钢筋混凝土结构的设计和非线性分析。

第 4 章钢筋混凝土结构有限元分析，介绍了钢筋混凝土结构的有限元模型，混凝土裂缝的模拟分析，钢筋和混凝土之间的粘结与滑移，混凝土与时间有关的效应，钢筋混凝土结构非线性有限元分析过程，钢筋混凝土结构有限元分析的工程应用。

第 5 章正截面承载力计算，回顾了正截面承载力计算的演变和发展，介绍了正截面承载力计算的基本假定和正截面承载力计算的一般方法，国内外不同规范（受弯构件正截面承载力）的计算方法及特点，受压构件包括短柱和长柱正截面承载力计算。

第 6 章斜截面受剪承载力计算，介绍了斜截面破坏形态和影响斜截面承载力的因素，斜截面受剪性能分析，受剪机理和受力模型分析，有腹筋梁的受剪承载力计算，深受弯构件受剪性能和受剪承载力分析，双向受剪性能和受剪承载力计算。

第 7 章扭曲截面承载力计算，介绍了平衡扭转与协调扭转，纯扭构件的破坏形态和计算理论及我国《规范》的配筋计算方法，弯剪扭构件的破坏类型和计算

理论及我国《规范》的配筋计算方法，最后对混凝土的受扭作用、扭曲截面承载力计算和设计方法进行了讨论。

第8章裂缝控制及耐久性设计，介绍了裂缝成因及对策，裂缝宽度的计算理论及计算公式，钢筋混凝土结构的耐久性及其设计的基本原则。

第9章预应力混凝土结构，重点介绍了无粘结部分预应力混凝土梁板的预应力损失、无粘结筋的应力计算，裂缝宽度和挠度的验算及构造规定，超静定预应力混凝土结构的特点和分析方法，主要介绍了实用的弹性分析法、等效荷载法和荷载平衡法。介绍了横张预应力混凝土结构的材料、构造、施工过程、承载能力极限状态和正常使用极限状态计算、持久状态及短暂状态的应力计算和构造要求。

第10章钢筋混凝土构件的延性与抗震，介绍了单调荷载与反复荷载下钢筋混凝土的延性，反复荷载下钢筋与混凝土之间的粘结力。

第11章高性能混凝土，介绍了高性能混凝土的配制，高性能混凝土构件的承载能力极限状态计算和正常使用极限状态的验算。

第12章纤维混凝土增强机理与工程应用，介绍了纤维混凝土的定义、分类及组成，纤维混凝土的工程应用及发展前景，钢纤维混凝土的性能和结构设计理论，合成纤维混凝土的组成、配制、早龄期防裂性能和力学性能。

第13章钢—混凝土组合结构，介绍了型钢混凝土组合结构，钢管混凝土结构和钢骨—钢管高强混凝土组合柱的力学性能和构造。

本书由大连理工大学赵国藩、宋玉普、王清湘、黄承逵，天津大学康谷贻、王铁成，河海大学康清梁、吴胜兴，合肥工业大学柳炳康合编，其中第1、2章由赵国藩编写，第3、9章由宋玉普编写，第8、11、13章由王清湘编写，第12章由黄承逵编写，第4章由吴胜兴编写，第5章由康清梁编写，第6章由王铁成编写，第7章由康谷贻编写，第10章由柳炳康编写。全书由赵国藩、宋玉普和王清湘修改全稿，由赵国藩主编，河海大学周氏教授主审。编者对主审人及机械工业出版社的编辑为保证本书质量所付出的辛勤劳动，表示衷心感谢。

对于书中存在的错误和缺点，热忱地希望有关兄弟院校在使用过程中及时指正。

编者

目 录

土木工程研究生系列教材序

前言

第1章 绪论	1
1.1 材料	1
1.2 结构	5
1.3 计算理论	7
1.4 耐久性	11
1.5 已建结构的鉴定与加固	12
1.6 试验技术	14
参考文献	14
第2章 钢筋混凝土结构可靠度设计理论	16
2.1 概述	16
2.2 结构随机可靠度分析的基本概念和方法	19
2.3 结构可靠度分析的一次二阶矩法	26
2.4 继续研究的问题	58
参考文献	61
第3章 普通混凝土的本构关系和破坏准则	63
3.1 概述	63
3.2 两向应力状态下普通混凝土的破坏形态和破坏准则	68
3.3 两向应力状态下普通混凝土的变形和本构关系	73
3.4 三向应力状态下普通混凝土的破坏形态和破坏准则	80
3.5 三向应力状态下普通混凝土的变形和本构关系	101
参考文献	124

第4章 钢筋混凝土结构有限元分析	128
4.1 概述	128
4.2 钢筋混凝土结构的有限元模型	129
4.3 混凝土裂缝的模拟	146
4.4 钢筋和混凝土之间的粘结与滑移	155
4.5 钢筋混凝土结构与时间有关的效应	157
4.6 钢筋混凝土结构非线性有限元分析过程	162
4.7 钢筋混凝土结构有限元分析的工程应用	170
参考文献	185
第5章 正截面承载力计算	187
5.1 概述	187
5.2 正截面承载力计算的基本假定	188
5.3 正截面承载力计算的一般方法	193
5.4 受弯构件正截面承载力计算	197
5.5 受压构件正截面承载力计算	206
5.6 允许应力法简介	217
参考文献	219
第6章 斜截面受剪承载力计算	221
6.1 斜截面破坏和承载力	221
6.2 斜截面受剪性能分析	234
6.3 受剪机理和受力模型分析	238
6.4 有腹筋梁的受剪承载力计算	243
6.5 深受弯构件受剪性能和受剪承载力	248
6.6 双向受剪性能和受剪承载力	256
参考文献	262
第7章 扭曲截面承载力计算	264
7.1 平衡扭转与协调扭转	264
7.2 纯扭构件的破坏形态及计算理论	266
7.3 纯扭构件按我国《规范》的配筋计算方法	271
7.4 弯剪扭构件的破坏类型及计算理论	275
7.5 弯剪扭构件按我国《规范》的配筋计算方法	283
7.6 问题讨论	291

参考文献	301
第8章 裂缝控制及耐久性设计	303
8.1 概述	303
8.2 裂缝的成因及对策	304
8.3 裂缝开展宽度计算理论及计算公式	308
8.4 裂缝控制验算公式	312
8.5 耐久性 & 耐久性设计的基本原则	316
参考文献	324
第9章 预应力混凝土结构	325
9.1 概述	325
9.2 无粘结部分预应力混凝土结构	326
9.3 超静定预应力混凝土结构	339
9.4 横张预应力混凝土结构	356
参考文献	378
第10章 钢筋混凝土构件的延性与抗震	380
10.1 单调荷载下钢筋混凝土构件的延性	380
10.2 反复荷载下钢筋混凝土构件的延性	389
10.3 反复荷载下钢筋与混凝土之间的粘结力	404
参考文献	413
第11章 高性能混凝土	414
11.1 概述	414
11.2 高性能混凝土配制	415
11.3 承载力极限状态计算	421
11.4 正常使用极限状态验算	425
参考文献	428
第12章 纤维混凝土增强机理与工程应用	430
12.1 概述	430
12.2 钢纤维混凝土的性能	438
12.3 钢纤维混凝土的结构设计理论	458
12.4 合成纤维混凝土	469

参考文献	481
第13章 钢—混凝土组合结构	484
13.1 概述	484
13.2 型钢混凝土组合结构	486
13.3 钢管混凝土结构	496
13.4 钢骨—钢管高强混凝土组合柱	508
参考文献	529
附录	531

第 1 章 绪 论

混凝土是现代工程结构的主要材料，我国每年混凝土用量约 10 亿 m^3 ，钢筋用量约 2000 万 t，规模之大，耗资之巨，居世界前列。1997 年的文献报导，我国工程建设中仅混凝土结构每年需耗资 2000 亿元以上。可以预见，钢筋混凝土将是我国今后相当长时期内的一种重要的工程结构材料。

在此，对钢筋混凝土的发展从材料、结构、计算理论、耐久性、已建结构的鉴定与加固、试验技术等几个方面给予简要介绍。

1.1 材料

物质是基础，钢筋混凝土结构设计理论在很大程度上是与其所用材料的发展密切相关的。

1.1.1 混凝土

组成钢筋混凝土的主要材料之一——混凝土的发展方向是高强、轻质、耐久、抗震、抗爆和抗冲磨。

1. 高性能混凝土

高性能混凝土是近年来混凝土材料发展的一个重要方向，高性能是指混凝土具有高强度、高耐久性、高流动性等多方面的优越性能。从强度而言，抗压强度大于 C50 的混凝土属于高强混凝土，提高混凝土的强度是发展高层建筑、高耸结构、大跨度结构的重要措施。采用高强混凝土可以减小截面尺寸，从而减轻自重，起到相辅相成的作用，进而获得较大的经济效益。我国已制成 C100 的混凝土。文献报导，国外在试验室的条件下水泥石的强度达到 662MPa（抗压）及 64.7MPa（抗拉）。在实际工程中，美国西雅图双联广场泵送混凝土 56d 抗压强度可达 133.5MPa。

在我国，为提高混凝土强度采用的主要措施有：

1) 合理利用高效减水剂，采用优质骨料、优质水泥，利用优质掺合料，如优质的磨细粉煤灰、硅粉、天然沸石或超细矿渣。采用高效减水剂以降低水灰比是获得高强混凝土的主要技术措施。

2) 采用 525、625 号及 725 号的硫铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥及相应的外加剂是中国建筑材料科学研究院制备高强混凝土的主要技术措施。

3) 以矿渣、碱组分及集料制备碱矿渣高强度混凝土是重庆建筑大学在引进

前苏联研究成果的基础上提出研制高强混凝土的技术措施。

4) 天津港湾工程研究所采用复合高效减水剂, 用 525 号水泥 $320\text{kg}/\text{m}^3$ 、水灰比 0.43 和 425 号水泥 $480\text{kg}/\text{m}^3$ 、水灰比 0.32, 在试验室中制成了 68MPa 和 65MPa 的高强混凝土。

高强混凝土具有优良的物理力学性能及良好的耐久性, 但是延性较差, 是其主要缺点。在**高强混凝土**中加入适量的钢纤维, 作成纤维增强**高强混凝土**, 可以提高抗拉、抗弯、抗剪强度, 大幅度地提高韧性(延性)和抗疲劳、抗冲击等性能。

在高层建筑的高强混凝土柱中, 也可采用 X 形配筋、劲性钢筋或钢管**高强混凝土**等结构方面的措施来改善**高强混凝土**柱的延性和抗震性能。辽宁省物资大厦工程的底层柱中就已成功地应用了加钢管的 C80 高强混凝土。

2. 轻集料

利用天然轻集料(如浮石、凝灰岩等)、工业废料轻集料(如炉渣、粉煤灰陶粒、自燃煤矸石等及其轻砂)、人造轻集料(页岩陶粒、粘土陶粒、膨胀珍珠岩等及其轻砂)制成的轻集料混凝土具有自重小、保温、抗冻性能好等优点。利用工业废渣, 如废弃锅炉煤渣、煤矿的煤矸石、火力发电站的粉煤灰等制备轻集料混凝土, 可降低混凝土的生产成本, 并变废为用, 减少城市或厂区的污染, 减少堆积废料占用的土地, 对社会环境也是有利的。

3. 纤维增强混凝土

为了改善混凝土的抗拉性能差、延性差等缺点, 在混凝土中掺加纤维以改善混凝土性能的研究发展得相当迅速。目前研究较多的有钢纤维、耐碱玻璃纤维、聚丙烯纤维或尼龙合成纤维等。

在承重结构中, 发展较快、应用较广的是钢纤维。钢纤维主要有用于土木工程中的碳素钢纤维和用于耐火材料工业中的不锈钢纤维。用于土木工程**的钢纤维**主要有以下几种生产方法: ①钢丝切断法; ②薄板剪切法; ③钢锭(厚板)铣削法; ④熔钢抽丝法(简称熔抽法)。

当纤维长度及长径比在常用范围, 纤维掺量在 1% ~ 2% (体积分数) 的范围内, 与基体混凝土相比, 钢纤维混凝土的抗拉强度可提高 40% ~ 80%, 抗弯强度提高 60% ~ 120%。抗剪强度提高 50% ~ 100%。抗压强度提高较小, 在 0 ~ 25% 之间。弹性阶段的变形性能则没有显著差别。

韧性是衡量钢纤维混凝土塑性变形性能的重要指标, 在通常的纤维掺量下, 与基体混凝土相比, 抗压韧性可提高 2 ~ 7 倍, 抗弯韧性可提高几十倍到上百倍, 冲击韧度可提高几倍到几十倍。

钢纤维混凝土的抗弯和抗压疲劳性能以及抗磨性较普通混凝土都有较大改善。

钢纤维混凝土的工程应用相当广泛。例如可用于三维复杂应力部位；用于预制桩的桩尖与桩顶部位，可取消桩顶防护钢板和铁制桩尖，并减少两端横向钢筋网的数量；用于抗震框架节点区，可减少钢筋用量，便于浇注节点区的混凝土；用于受弯受拉作用的水管、刚性防水屋面、地下人防工程、地下泵房和地下室的防水，可取得良好的效果。

在桥梁建筑中，在混凝土拱桥受拉区段用钢纤维提高抗拉强度，可降低主拱高度，减轻拱圈自重。钢纤维混凝土用于桥梁桥面新建或大修，用于修筑或改建公路路面及机场道面，可大大延长维修的周期。在铁路小半径曲线及轨道接头两侧，用钢纤维增强的预应力混凝土轨枕代替木枕等均有显著的经济价值。最近在举世闻名的三峡工程对外交通公路重载（汽-36、挂-2000kN）桥梁的桥面及钢管拱肋也采用了钢纤维混凝土，得到工程技术界的重视。在水工建筑中，钢纤维混凝土用于高速水流冲刷、磨损部位，如闸门的门槽、渡槽的受拉区，喷射钢纤维混凝土用于水电站有压隧洞衬砌工程、大坝防渗面板、隧洞及泄洪洞以及矿山井巷、房屋、桥墩等加固工程中；还用在海拔4500m的永冻地区的公路路面，国防工程中的防护门，海港港内道路及堆场罩面工程以及一些特殊结构和构件，如钢筋混凝土煤仓、市政道路的排水井篦等。

中国工程建设标准化协会于1992年批准颁布了“钢纤维混凝土结构的设计与施工规程”（CECS38:92），对推广钢纤维混凝土的应用起了重要的作用。

钢纤维混凝土用常规的施工技术，其钢纤维一般为0.6%~2.0%（体积分数）。再高的钢纤维在施工搅拌过程中容易结团成球，影响钢纤维混凝土的质量。国内外正在研究一种钢纤维5%~27%（体积分数）的简称为SIFCON的砂浆渗浇钢纤维混凝土，其施工技术不同于一般的搅拌浇注成型的钢纤维混凝土，而是先将钢纤维松散填放在模具内，然后灌注水泥浆或砂浆，硬化成型。SIFCON与普通钢纤维混凝土相比，其特点是抗压强度比基体材料大幅度提高，达100~200MPa，其抗拉、抗弯、抗剪强度以及延性、韧性等也比普通体积率的钢纤维混凝土有更大的改善。

另一种名为SIMCON的施工方法与SIFCON基本相同，只是预先填置在模具内的不是乱向分布的钢纤维（Fiber），而是钢纤维网（Mat）制成的产品——砂浆渗浇钢纤维网混凝土，其纤维体积率一般为4%~6%。试验表明，SIMCON较之SIFCON可用较低的钢纤维体积率而达到相同的强度和韧性，从而取得比SIFCON节约钢材和造价的效果。

虽然SIFCON或SIMCON力学性能优良，但由于钢纤维用量大、一次性投资高、施工工艺特殊，只是在必要时用于某些特殊的结构或构件的局部，如火箭发射台等。

钢丝网水泥，在砂浆中铺设钢丝网及架立用的骨架钢筋作为薄壁结构，具有

良好的抗裂能力和变形能力。在国内外造船、水利、建筑工程中应用较为广泛。近年来，在钢丝网水泥中又掺入钢纤维建造公路路面、渔船、农船等取得了更好的双重增韧、增强效果。

4. 碾压混凝土

碾压混凝土是国内外近年发展比较快的一种新型混凝土，可用于大体积混凝土结构（如水工大坝、大型基础）、工业厂房地面、公路路面及机场道面等。

用于大体积混凝土的碾压混凝土的浇注机具与普通混凝土不同，其平整使用推土机，振实用碾压机，层间处理用刷毛机，整个施工过程的机械化程度高，施工效率高，劳动条件好，可大量掺用粉煤灰，与普通混凝土相比，浇注工期可缩短 $1/3 \sim 1/2$ ，用水量可减少 20%（质量分数），水泥用量可减少 30% ~ 60%（质量分数）。

碾压混凝土的层间抗剪性能是修建混凝土高坝的关键，这方面的研究工作国内正在开展。

在公路路面、工业厂房地面等大面积混凝土工程中，采用碾压混凝土，或者在碾压混凝土中再加入钢纤维，成为钢纤维碾压混凝土，其力学性能及耐久性还可进一步改善。

5. 特种混凝土

除上述几种近年来发展较快的混凝土外，其他，如泵送混凝土、免振自密实的流态混凝土应用得比较广泛；还有水下浇注混凝土；预先在模板内填实粗骨料，而后将水泥砂浆用压力灌入粗骨料空隙中形成的压浆混凝土；采用膨胀水泥或加膨胀剂制成的膨胀混凝土、喷射混凝土、聚合物混凝土等也得到应用。

1.1.2 配筋

钢筋混凝土结构的配筋材料，主要是钢筋。最近在国际上研究较多的是树脂粘结的纤维筋（FRP）作混凝土及预应力混凝土结构的非金属配筋。常用的纤维筋有树脂粘结的碳纤维、玻璃纤维及芳纶（Aramid）纤维。研究指出，碳纤维、Aramid 纤维及玻璃纤维制成的筋材，强度都很高，只是玻璃纤维筋的抗碱化性能较差。

在钢筋方面，目前广泛采用新Ⅲ级钢（HRB400），这种钢筋强度高，延性好。另外，为了减少裂缝宽度和构件的变形，研究采用焊成梯格形的双钢筋。

在海洋环境或者有腐蚀性介质的环境中，如冬季撒盐的桥面，钢筋锈蚀是影响结构耐久性的重要原因。为了防止钢筋锈蚀，用不锈钢制造钢筋是一个途径，但是价格昂贵；另一个途径是用环氧树脂涂敷钢筋表面，形成防锈的涂层，防止钢筋生锈，这种方法在日本、美国应用较多，我国也有应用。钢筋在工厂中校直、加热、喷涂树脂粉末，形成防护薄膜，冷却后检验合格，用于有严格防锈要

求的工程，可使结构的耐久性大大提高。

1.2 结构

1.2.1 钢—混凝土组合结构

近年来值得注意的发展方向之一，是钢—混凝土组合结构。如钢板混—凝土用于地下结构及混凝土结构的加固；压型钢板—混凝土用于楼板；型钢与混凝土的组合梁用于楼盖或桥梁；外包钢混凝土柱用于电厂主厂房等。在钢管内浇注混凝土，制成的钢管混凝土柱或受压构件，由于钢管对混凝土受力时的侧向约束作用，使管内混凝土处于三向受压状态，而管内的混凝土又对薄壁钢管有侧向支撑作用，抑制薄壁钢管的局部失稳，因而使钢管混凝土柱的承载能力和抗变形能力都大幅度提高。而且钢管又是浇注混凝土的模板，在横向又代替箍筋起抗剪作用和约束作用，钢管本身在施工阶段还可起到劲性钢骨架的作用，简化施工。由于钢管混凝土有这样一些优点，因而在工程中应用较广。

在钢—混凝土组合梁中，将工字形钢腹板按折线形切开，改焊成高度更大的蜂窝形梁，如图 1-1 所示。其中图 1-1a 为折线形切开图，图 1-1b 为焊成的蜂窝形梁。这样既提高了抗弯能力又便于管道通过有洞的腹板，在电厂结构中已得到应用。

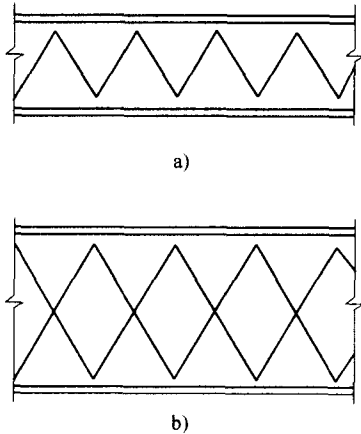


图 1-1 蜂窝形梁示意图

a) 折线形切开图 b) 焊成的蜂窝形梁

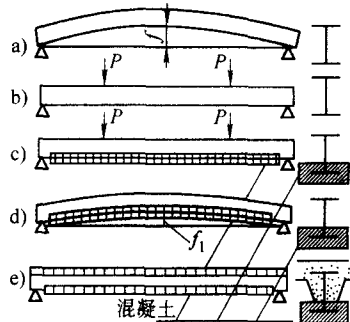


图 1-2 预弯复合梁的制作流程

a) 预制的带有拱度的工字形钢梁 b) 对梁施加荷载
c) 在受拉的下翼缘浇注混凝土 d) 卸载后，下翼缘混凝土受到预压力 e) 浇注上部混凝土

近年来比利时、日本以及我国正在研究应用一种预弯型钢的预应力梁。预弯