

高等学校给水排水工程专业规划教材

# 给水排水工程结构

(第二版)

湖 南 大 学 廖 莎  
重 庆 大 学 余 瑜 姬 淑 艳 编 著  
太 原 理 工 大 学 武 军  
刘 健 行 主 审



中国建筑工业出版社

高等学校给水排水工程专业规划教材

# 给水排水工程结构

(第二版)

湖 南 大 学 廖 莎  
重 庆 大 学 余 瑜 姬 淑 艳 编 著  
太 原 理 工 大 学 武 军

刘健行 主审

中国建筑工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

给水排水工程结构/湖南大学, 重庆大学, 太原理工大学编  
著. —2 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2006  
高等学校给水排水工程专业规划教材  
ISBN 7-112-08582-9

I. 给... II. ①湖... ②重... ③太... III. ①给水工程-  
工程结构-高等学校-教材②排水工程-工程结构-高等学校-教材  
IV. TU991

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 115641 号

本书为高等学校给水排水工程专业用教材, 是在 1981 年试用教材《给水排水工程结构》的基础上经几度修订形成的。本版为第二版, 内容根据《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—1992)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、《给水排水工程构筑物结构设计规范》(GB 50069—2002)、《给水排水工程钢筋混凝土水池结构设计规程》CECS138: 2002 等新规范、规程重新订正。

本书共九章, 内容包括: 钢筋和混凝土的力学性能, 钢筋混凝土结构的基本计算原则, 钢筋混凝土受弯、受压、受拉承载力计算, 裂缝与变形计算, 钢筋混凝土梁板结构设计, 钢筋混凝土柱下基础设计, 钢筋混凝土水池设计等。

本书也可供给水排水专业和土建类工程技术人员参考。

\* \* \*

责任编辑: 王 跃 齐庆梅  
责任设计: 赵明霞  
责任校对: 邵鸣军 张 虹

## 高等学校给水排水工程专业规划教材 给水排水工程结构 (第二版)

湖 南 大 学 廖 莎  
重 庆 大 学 余 瑜 姬 淑 艳 编 著  
太 原 理 工 大 学 武 军  
刘 健 行 主 审

\*

中国建筑工业出版社出版 (北京西郊百万庄)  
新华书店总店科技发行所发行  
北京密云红光制版公司制版  
北京建筑工业印刷厂印刷

\*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 26 字数: 633 千字  
2006 年 11 月第二版 2006 年 11 月第十五次印刷  
印数: 51901—54900 册 定价: 35.00 元

ISBN 7-112-08582-9  
(15246)

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)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

## 第 二 版 前 言

由重庆大学、太原工学院、湖南大学三校合编的高等学校试用教材《给水排水工程结构》第一版自 1981 年出版以来,在各高校的给水排水专业教学中使用了 20 余年。在此期间,工程结构领域的科学研究和实践都有了很大的进展,有关的专业设计规范也作了相应的更新。该书曾于 1993 年根据《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—84)、《混凝土结构设计规范》(GBJ 10—89)、《砌体结构设计规范》(GBJ 3—88)及《给水排水工程结构设计规范》(GBJ 69—84),对已显过时的部分作了一次大的修订,使近十多年来给排水专业学生在工程结构设计领域的知识基本与国家有关设计规范相适应。随着 2002 年前后有关工程结构设计规范体系的变化和内容的再次扩展与更新,本书感陈旧,为了满足当前教学的迫切要求,并与新一轮修订后的国家工程结构设计规范的规定相统一,我们重新编写了本书。

本书内容的基本构架仍按原书未作大的改变。具体内容则根据《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—92)、《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、以及《给水排水工程构筑物结构设计规范》(GB 50069—2002)、《给水排水工程钢筋混凝土水池结构设计规程》CECS138:2002 等新的规范规程的内容作了全面的改写和增删。

根据给排水专业对该课程的教学大纲要求,在本书中安排了混凝土结构材料的基本性能、钢筋混凝土结构设计的基本计算原则、钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算、钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算、钢筋混凝土受弯构件的裂缝和挠度验算、钢筋混凝土受压构件及柱下基础、钢筋混凝土受拉构件、钢筋混凝土梁板结构设计、钢筋混凝土水池结构设计等内容。由于各个学校在给水排水专业学生的培养方向上有各自的侧重,《给水排水工程结构》课程的讲授学时并不统一,大体在 30~60 学时的范围内变化。按此,我们在编写本教材时,力求做到基本概念明确、设计思路清晰、计算例题经典和实用设计示例规范。各校可根据自己的学时情况进行取舍,重点概念内容在课堂讲授,设计实例可留给学生自学掌握。为弥补第一版中无习题带来的教学不便,这次修订在各章节后附有习题。

本书作为给水排水专业本科生教材,也可作为土木工程专业选修《特种结构》的参考书及供工程设计人员参考使用。本书的编写分工为:绪论、第九章由湖南大学廖莎执笔;第一、二章由重庆大学余瑜执笔,第三、四、五章由重庆大学姬淑艳执笔;第六、七、八章由太原理工大学武军执笔。全书由廖莎主编并统稿,刘健行主审。湖南大学土木工程学院尚守平院长、重庆大学土木工程学院张永光院长、结构教研室主任支运芳教授、太原理工大学土木工程学院雷宏刚院长对本书的修订作了许多组织和联系工作,特在此对他们表示衷心感谢。

限于编者的水平,书中缺点和错误在所难免,尚请读者批评指正。

## 第一版前言

由重庆建筑工程学院、太原工学院（现太原工业大学）、湖南大学三院校合编的高等学校试用教材《给水排水工程结构》自1981年出版以来，至今已使用十年有余。在此期间，工程结构领域的科学研究和实践都有了很大的进展，有关的专业设计规范几乎都已更新，因此，原书已感陈旧而不再适用，为满足当前教学的迫切需要，我们重新编写了本书。

本书内容的基本构架仍按原书未作大的改变。具体内容则根据我国近几年陆续颁布执行的《建筑结构设计统一标准》GBJ 68—84、《混凝土结构设计规范》GBJ 10—89及《砌体结构设计规范》GBJ 3—88等新规范作了全面的改写和增删。在编写过程中还参考了《给水排水工程结构设计规范》GBJ 69—84，同时注意到这本规范的部分内容已经过时。

本书内容的安排在原则上参照了1983年全国高等院校给水排水专业教学大纲会议制订的四年制本科用《给水排水工程结构》课程教学大纲，但目前各高等院校对这一课程的讲授学时并不统一，大体上在60~96学时的范围内变化。故在编写本教材时，考虑到了适应各种学时安排的内容选择问题。例如第九章中标有“\*”号的节、段及第十章、第十一章（砌体结构部分）都可以作为不在课堂讲授的参考内容，其他各章也可根据具体情况在讲授时作适当的删节。

本书的编写分工：绪论、第九章由湖南大学刘健行执笔；第一至第五章和第十、十一章由重庆建筑工程学院郭先瑚执笔；第六、七、八章由太原工业大学苏景春执笔。全书由刘健行主编，天津大学于庆荣主审。重庆建筑工程学院建工系主任白绍良教授为重编本书作了许多前期的组织和联系工作，并对本书的内容提出了宝贵意见，特在此对他表示衷心感谢。

限于编者的水平，书中缺点和错误在所难免，尚希读者批评指正。

编者  
1993年10月

# 目 录

绪论	1
第一章 钢筋和混凝土的力学性能	6
第一节 钢筋	6
第二节 混凝土	11
第三节 钢筋和混凝土共同工作	24
思考题	30
第二章 钢筋混凝土结构的基本计算原则	31
第一节 结构的功能要求和极限状态	31
第二节 结构上的作用、作用效应及结构抗力和功能函数	33
第三节 结构的可靠度和可靠指标	35
第四节 荷载代表值和材料性能标准值	38
第五节 极限状态设计表达式	40
思考题	44
第三章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	45
第一节 单筋矩形梁正截面承载力计算	45
第二节 双筋矩形梁正截面承载力计算	60
第三节 单筋 T 形梁正截面承载力计算	66
第四节 截面构造规定	74
思考题	77
习题	77
第四章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	78
第一节 斜截面的受剪破坏形态及受力特点	79
第二节 斜截面受剪承载力计算	81
第三节 斜截面受弯承载力	92
第四节 箍筋及弯起钢筋的其他构造要求	96
思考题	98
习题	98
第五章 钢筋混凝土受弯构件的裂缝宽度和挠度验算	100
第一节 钢筋混凝土受弯构件的裂缝宽度验算	100
第二节 钢筋混凝土受弯构件的挠度验算	107
思考题	113
习题	113
第六章 钢筋混凝土受压构件及柱下基础	115

第一节	轴心受压构件	115
第二节	偏心受压构件	120
第三节	钢筋混凝土柱下基础设计	137
	习题	145
<b>第七章</b>	<b>钢筋混凝土受拉构件</b>	<b>146</b>
第一节	轴心受拉构件	146
第二节	偏心受拉构件	148
	习题	155
<b>第八章</b>	<b>钢筋混凝土梁板结构设计</b>	<b>156</b>
第一节	整体式单向板肋形梁板结构	158
第二节	整体式双向板肋形梁板结构	193
第三节	圆形平板	198
第四节	整体式无梁板结构	207
第五节	板上开孔的构造处理	213
	习题	215
<b>第九章</b>	<b>钢筋混凝土水池设计</b>	<b>216</b>
第一节	水池的结构形式	216
第二节	水池上的作用	218
第三节	地基承载力及抗浮稳定性验算	223
第四节	钢筋混凝土圆形水池设计	225
第五节	钢筋混凝土矩形水池设计	269
第六节	预应力混凝土圆形水池设计	322
	附录	345
	参考文献	410

## 绪 论

给水排水工程的生产流水线总是由各种功能的构筑物如泵站、水池等用管、渠联系并配置以管理和辅助建筑组成的。这些构筑物和建筑物的功用、生产能力及相互配合，由工艺设计来确定，但是，任何一项工程设计，只有工艺设计还不足以付诸实施，必须进行建筑和结构设计。

在给水和排水工程中，构筑物和建筑物的结构部分往往占用相当一部分建设投资，而结构设计的质量又直接关系到给水排水工程的安全性、适用性和耐久性。结构设计的任务，就是要根据技术先进、经济合理、安全适用、确保质量的原则，合理的选择材料和结构形式，进行结构布置，确定结构构件的截面和构造等。学习“给水排水工程结构”这门课程的目的，就是使学生掌握给水排水工程结构的设计基本知识。

### (一)

给水排水工程结构作为结构工程中的一个专门领域，在我国是解放后才形成的。出于大规模基本建设的需要，在 20 世纪 50 年代我国成立了一批专门从事市政工程或给水排水工程设计与科研的设计院和研究所，促使给水排水工程结构的设计与研究走向专业化。

给水排水工程结构无论从使用要求、结构形式、作用荷载及施工方法等方面来说，都有其特殊性。给、排水构筑物大多是形状比较复杂的空间薄壁结构，对抗裂抗渗漏、防冻保温及防腐等有较严格的要求；在荷载方面，除一般工程结构可能遇到的重力荷载、风荷载、雪荷载及水压力、土压力外，给、排水构筑物还常须对温度作用、混凝土收缩及地基不均匀沉陷等引起的外加变形或约束变形进行较慎密的考虑。针对给水排水工程结构的特殊性，半个世纪来，我国以各专业设计院、科研单位和部分高等院校为骨干，对给水排水工程结构的设计计算理论和方法，进行了系统的研究和经验积累。特别是在结构及构件的合理型式、荷载取值、内力计算方法、钢筋混凝土的抗裂及裂缝宽度的计算、防止和限制裂缝的构造措施、预应力混凝土水池的设计计算方法、软弱地基的处理等方面，取得了丰富的研究成果和实践经验，使我国在给水排水工程结构设计方面形成了具有自己特色的较完整的体系。在长期研究和实践的基础上，我国于 1984 年完成了第一本作为国家标准的《给水排水工程结构设计规范》(GBJ 69—84) 的编制，并于 1985 年颁布施行。这本规范可以认为是我国给水排水工程结构设计专业化、标准化的里程碑。与此同时，在 1984 年还出版了由国内七家具有权威性的市政工程设计院和给水排水设计院合编的《给水排水工程结构设计手册》。这是一部内容浩繁、篇幅巨大的工具书，在一定程度上反映了国内的主要专业设计院从 20 世纪 50 年代至 80 年代初 30 余年宝贵的设计经验。

自 1980 年代以来，随着国家实行改革开放政策，经济建设进入了一个新的高速发展阶段，科学技术突飞猛进，国际交流频繁，也大大促进了结构工程技术的进步。特别是电子计算机的普遍应用，使结构设计的可靠度理论、计算力学、结构受力工作的全过程分



析、计算机模拟及计算机辅助设计 (CAD) 等方面都取得了前所未有的成就, 并进入了工程应用中, 使设计工作面貌为之一新。目前在给水排水工程设计和研究领域, 应用有限单元法或其他较精确的计算力学方法对复杂结构进行分析及应用计算机辅助设计已相当普及, 在很大程度上提高了设计的质量和效率。

给水排水工程结构作为结构工程的一个专门领域, 其设计理论模式和方法固然有其特殊性, 但它的基本设计原则与整个结构工程的要求是一致的, 它既反映一定阶段上国内外该领域最新的科学研究成果和技术进步, 又充分体现国家的技术和经济政策。我国于 1992 年颁布的《工程结构可靠度统一标准》(GB 5013—92), 2001 年修订的《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2001), 对建筑结构设计的基本原则、主要是结构可靠度和极限状态设计原则作出了统一规定。规定了结构设计均采用以概率理论为基础的极限状态设计方法, 替代了原规范 (GBJ 69—84) 采用的单一安全系数极限状态设计方法。据此, 有关结构设计的各种标准、规范均作了修订, 如《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)、《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、《地基基础设计规范》(GB 50007—2002) 等。在此基础上原《给水排水工程结构设计规范》(GBJ 69—84) 也相应地进行了必要的修订, 形成新的《给水排水工程构筑物结构设计规范》(GB 50069—2002)。

新修订的“规范”在体系上也作了一些改变, 与国际上的规范系统更加统一, 减少了综合性, 方便在内容上进行修订和增补, 有利于及时吸收最新的技术成果, 实现国际交流和引进国外先进技术。新的规范体系将给水排水工程结构设计的规范分为两个层次, 共 10 本标准, 其中两本为国家标准, 即:《给水排水工程构筑物结构设计标准》、《给水排水工程管道结构设计标准》。其余为协会标准, 如:《给水排水工程钢筋混凝土水池结构设计规程》、《给水排水工程水塔结构设计规程》、《给水排水工程埋地矩形管管道结构设计规程》等。两个层次规范之间的关系是: 国家标准主要是针对给水排水工程结构设计中的一些共性要求作出原则性的规定, 而协会标准则针对各具特点的构造物和管道的具体内容作出更具体的规定, 通过具体的规定来贯彻国家标准的原则。在规范实施期内, 给水排水工程结构设计的主要依据就是遵循这些标准和规程的要求, 特别是那些强制性条文的相关规定。

我们正处于一个科技迅猛发展的时代,《给水排水工程结构》作为一门应用学科的课程, 学习时必须随时注意本学科及相关学科的最新发展。

## (二)

我国的给水排水工程构筑物主要采用混凝土结构。所谓混凝土结构, 包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构, 但主要是钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。不配置钢筋的素混凝土结构由于抗拉能力差, 通常只用于以受压为主的基础、支墩及必须依靠自身的重量来保持稳定性的重力式支挡结构 (如挡土墙、挡水墙) 等。

钢筋混凝土是将混凝土和钢筋这两种性能不同的材料结合起来共同工作, 互相取长补短的很理想的现代结构材料。混凝土是一种抗压强度较高而抗拉强度很低的脆性材料, 但具有很好的耐久性, 而且制作混凝土的原料 (水泥、石子和砂子) 来源广泛, 价格低廉。钢材是一种抗拉 (和抗压) 强度很高的延性材料, 但价格较贵, 且易于锈蚀。如果在混凝土中适当配置钢筋, 让压力主要由混凝土来承担, 拉力主要由钢筋来承担, 混凝土又可以

保护钢筋免遭锈蚀，则可以达到降低造价、节约钢材、获得性能良好结构的目的。

对图 1 所示的两根梁进行对比，可以说明钢筋混凝土结构的基本概念。图 1 (a) 是一根未配置钢筋的素混凝土梁，如果在梁上施加逐步增大的荷载，则随着荷载的加大，梁截面中由于弯矩引起的拉、压应力也逐渐增大。由于混凝土的抗拉强度远低于其抗压强度，故当梁的荷载尚小时，最大弯矩所在截面中受拉边缘的拉应力就将达到混凝土的抗拉强度而导致开裂，使梁立即折断。这种梁不仅承载能力低，混凝土的抗压强度未能被充分利用，而且其破坏是一种很危险的、突然发生的脆性断裂，因此，素混凝土梁在工程中没有什么实用价值。

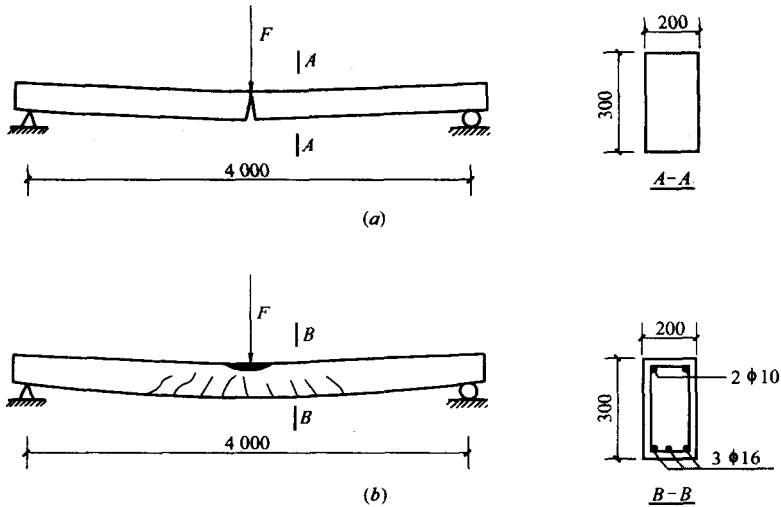


图 1 素混凝土梁和钢筋混凝土梁的破坏情况对比

如果在混凝土梁的受拉区配置一定数量的纵向钢筋，梁的承载能力和工作性能就会得到明显的提高和改善。如图 1 (b) 所示，梁在达到比素混凝土梁的破坏荷载稍大的荷载时，受拉区也会由于混凝土应力超过抗拉强度而出现裂缝，但梁不会破坏而能继续加大荷载。钢筋混凝土梁开裂以后，裂缝截面的受拉区混凝土退出工作，荷载引起的拉应力将全部由钢筋承担。由于钢筋具有很高的强度和弹性模量，在钢筋应力没有达到屈服点以前，它能有效地限制混凝土裂缝的开展，使梁能继续承受增大的荷载，只有当荷载增大到使钢筋应力达到屈服点以后，受压区混凝土被压坏时，梁的承载能力才告耗竭。可以说明，由于配置了钢筋，混凝土的抗压强度能够得到充分利用，构件的承载能力显著提高，构件破坏以前将发生较大的变形而具有预兆，即破坏不再是脆性的。

对受力不同的其他各类结构构件，同样可以通过在适当部位配置钢筋来改善构件的受力工作性能，提高构件的承载能力，这包括在构件内配置受压钢筋。因此，各种不同的受力构件都可以采用钢筋混凝土。

总的来说，钢筋混凝土是一种比较优越的结构材料，主要具有以下优点：

- (1) 便于就地取材 与钢结构比较，能节约钢材，降低造价。
- (2) 便于造型 混凝土可以浇注成各种形状的结构和构件；给水排水工程构筑物常具有造型复杂的特点，采用钢筋混凝土结构尤为适宜。

- (3) 耐久性好。
- (4) 耐火性好。
- (5) 整体性好, 抗震能力强。

当然, 钢筋混凝土结构也存在一些缺点, 主要是自重大 ( $25\text{kN/m}^3$ )、抗裂性较差、加固和改建比较困难以及在低温条件下施工时需要采取专门的保温防冻措施等。此外, 现浇钢筋混凝土结构模板木材的消耗量大, 施工周期也较长。近年来已经采取了不少措施来克服上述缺点, 并取得了显著的成效。例如采用工具式滑动模板等来降低木模消耗和施工成本, 加快施工速度。采用轻骨料混凝土减轻自重 ( $14 \sim 18\text{kN/m}^3$ )。采用预应力混凝土可以改善构件的抗裂性, 有效地利用高强钢材以降低钢材消耗, 减小截面尺寸, 减轻构件自重。所谓预应力混凝土, 就是在承受外荷载以前已建立有内应力的混凝土。通常是使外荷载可能引起拉应力的区域建立预压应力, 这样就可以推迟因外荷载而引起的开裂, 因为外荷载必须先抵消混凝土的预压应力, 才能使混凝土进入受拉状态。在钢筋混凝土结构中, 预应力一般是用张拉高强钢筋并将其锚固于混凝土, 利用被张拉钢筋的回弹使混凝土受压而建立起来的。我国在大型圆形水池中采用预应力混凝土池壁已积累了丰富的实践经验, 建立了较完善的设计方法和施工工艺。在大型矩形水池中采用预应力混凝土也取得了一定的成绩。

### (三)

本书的内容大体上可以划分为两大部分; 第一部分第一到第七章, 为钢筋混凝土基本理论部分, 包括混凝土结构材料的物理力学性能、钢筋混凝土结构的基本计算原则和各类基本构件(拉、压、剪、弯)的计算方法和构造要求。这部分内容是以我国现行《建筑结构设计统一标准》(GB 50068—2001)和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)为主要依据编写的。第二部分第八和第九两章, 为钢筋混凝土结构设计部分, 介绍了钢筋混凝土梁、板结构及水池结构设计。第八章虽然具体讨论的是梁、板结构, 但这一章的内容实际上是设计各类现浇混凝土结构的通用知识。由于给排水构筑物种类繁多, 不可能在书中一一加以介绍, 故在第九章中仅以应用最多的具有一定典型性的构筑物——水池为例, 对构筑物结构设计的全过程作了比较全面的介绍, 以便学生对这类构筑物的设计方法、计算步骤和构造原则获得一个比较完整的概念。这一章是结合《给水排水工程构筑物结构设计规范》(GB 50069—2002)和《给水排水工程钢筋混凝土水池结构设计规程》(CECS138: 2002)的要求编写的。

学习本课程时, 希望学生能注意以下特点:

(1) 由于材料物理力学性能的复杂性, 混凝土结构基本计算理论是以试验为基础的。在钢筋混凝土基本构件计算公式中有相当一部分是根据试验研究获得的半理论半经验公式, 对这些公式, 应特别注意其试验基础、简化的物理力学模型、适用条件和应用方法。

(2) 结构设计是一种富有创造性的劳动, 如果将一项设计任务看成一个命题, 则其解答不是惟一的。任何一项设计都有多种方案可供选择。在结构设计的全过程中, 材料和结构类型的选择及结构布置等决策性步骤, 对结构的安全适用、经济合理往往比个别截面的设计计算具有更大的影响, 因此, 尽管本书对这些方面的论述所占的篇幅较少, 但应充分认识其重要性, 并注意培养自己在结构设计工作中的决策能力。

(3) 构造设计是结构设计的重要内容之一。结构计算只是结构设计的手段之一，并不是所有的问题都能通过计算来解决。构造设计的基本原则大体上可以归纳为：保证结构的实际工作尽可能与计算假定相符合；采用构造措施来保证结构足以抵抗计算中忽略了而实际上可能存在的内力；采用构造措施避免发生不希望的破坏状态，例如增加结构的延性；采用构造措施来保证结构在灾害或偶然事故发生时的稳定性，避免因结构的局部破损而造成连锁倒塌；采用构造措施来增强结构的抗裂性、抗渗漏性和耐久性等。构造设计的大部分工作是在绘制施工图的过程中完成的，构造设计更多地依赖于经验。本书所介绍的构造知识，部分为规范所规定，部分为行之有效的常规做法。学生在学习构造知识时往往感到繁琐枯燥，经常有所偏废，这种现象应该克服。在工程事故中，由于构造不当而酿成灾害屡见不鲜，因此，对构造问题不能掉以轻心。在学习构造知识时，应注重对构造原则的理解和掌握，对所采用的构造措施，应明确认识其目的，对一些基本的构造规定，应加强记忆。

# 第一章 钢筋和混凝土的力学性能

钢筋和混凝土这两种材料的力学性能以及它们的共同工作特性，是学习钢筋混凝土结构理论所必须具备的基础知识。这是因为钢筋混凝土结构的计算理论、计算方法和构造措施都是以这两种材料所具有的特定力学性能为依据的；另一方面，只有全面了解这两种材料的品种、性能和生产供应情况，才能在设计中根据每个工程的具体条件正确选择材料。

## 第一节 钢 筋

钢筋所用的原材主要是碳素钢和普通低合金钢。其主要性能与含碳量的多少有密切关系：含碳量增加，钢材强度随之提高，塑性随之降低；含碳量减少，钢材强度随之降低，塑性性能却随之得到改善。碳素钢除含有铁元素外，还含有少量的碳、硅、硫、磷等元素。含碳量小于0.25%的碳素钢称为低碳钢；含碳量为0.25%~0.6%的碳素钢称为中碳钢，含碳量大于0.6%的碳素钢称为高碳钢。

在钢的冶炼过程中有目的地加入一定量的一种或几种合金元素（如硅、锰、钒、钛等），以改善钢材的某些性能（如强度、塑性、抗腐蚀性、可焊性、抗冲击韧性等），所获钢材称为合金钢。若所加合金元素的总含量在3%~5%以下，则称为低合金钢。

在钢筋的化学成分中，磷和硫是有害的元素，磷、硫含量多的钢筋塑性就大为降低，容易脆断，而且影响焊接质量，所以对其含量要予以限制。

### 一、钢筋的品种和形式

我国用于混凝土结构的钢筋主要有热轧钢筋、消除应力钢丝、钢绞线及热处理钢筋四种。热轧钢筋也称普通钢筋，主要用作钢筋混凝土结构中的钢筋及预应力混凝土中的非预应力钢筋，其余三种钢筋则只用作预应力混凝土结构中的预应力钢筋。

热轧钢筋是用低碳钢、普通低合金钢在高温下轧制而成。热轧钢筋为软钢，其应力应变曲线有明显的屈服点和流幅，断裂时有颈缩现象，伸长率较大。根据力学指标的高低，分为HPB235级（Φ），HRB335级（Φ），HRB400级（Φ），RRB400级（Φ<sup>R</sup>）四个种类。其中HPB235级为低碳钢，其余均为低合金钢。HRB400和RRB400属同一强度等级的钢筋。但RRB400为余热处理钢筋，它所用的原材与HRB335相同，原材都是20MnSi，其强度的提高并能保留一定的塑性是通过热轧后淬火，再利用芯部余热回火获得的。因此这种钢筋在焊接时有可能因受热回火而使强度降低，并且其高强部分集中在钢筋的表层，疲劳性能、冷弯性能可能受到影响等等，使其应用受到一定限制。因此在工程中宜优先选用HRB400钢筋。

钢筋按外形的不同可分为光圆钢筋和变形钢筋两大类。变形钢筋是用辊轧或其他机械加工的方法使钢筋表面形成肋纹或凹痕等以提高钢筋在混凝土中的锚固能力。热轧钢筋中

HPB235 为光圆钢筋。HPB235 强度太低，加上表面光圆锚固性能差，故不宜用作主要受力钢筋。其余三种热轧钢筋都是表面具有两条平行纵肋和斜向月牙纹横肋的所谓带肋钢筋（图 1-1）。

消除应力钢丝包括光面钢丝（ $\Phi^P$ ）、螺旋肋钢丝（ $\Phi^H$ ）和三面刻痕钢丝（ $\Phi^I$ ）三种不同外形的钢丝（图 1-1）。所谓消除应力钢丝，是按下述一次性连续处理方法之一生产的钢丝：

- (1) 钢丝在塑性变形下（轴应变）进行的短时热处理；
- (2) 钢丝通过矫直工序后在适当温度下进行的短时热处理。

按方法（1）处理所得到的钢丝应是低松弛钢丝；按方法（2）处理所得到的钢丝应是普通松弛钢丝。所谓“松弛”，是指承受拉力的钢筋在恒定长度下应力随时间而减小的现象。对预应力钢筋，其松弛性能是影响预应力损失的一种重要性能。

钢绞线（ $\Phi^S$ ）是用预应力混凝土用圆形断面钢丝捻制，捻制后再进行消除应力的热处理而成的。钢绞线也分普通松弛和低松弛两种。钢绞线按捻制结构分为  $1 \times 2$ 、 $1 \times 3$  和  $1 \times 7$  三类（即分别为用 2 根、3 根和 7 根钢丝捻制成的钢绞线）。图 1-1 中所示为按  $1 \times 7$  钢丝捻制的钢绞线示意图。

热处理钢筋（ $\Phi^{HT}$ ）是用牌号为 40Si2Mn、48Si2Mn 和 45Si2Cr 的热轧钢筋再经过加热、淬火和回火等调质工艺处理的钢筋。热处理后的钢筋强度得到较大幅度的提高，而塑性则降低不多。热处理钢筋的外形为月牙形带肋钢筋，但分无纵肋和有纵肋两种不同的形式。热处理钢筋存在容易因应力腐蚀而脆断的缺点。这种钢筋以往主要用于某些预应力预制构件，实际在工程中很少应用。

消除应力钢丝、钢绞线和热处理钢筋都属于硬钢，即其应力应变曲线不存在明显的屈服点和流幅。

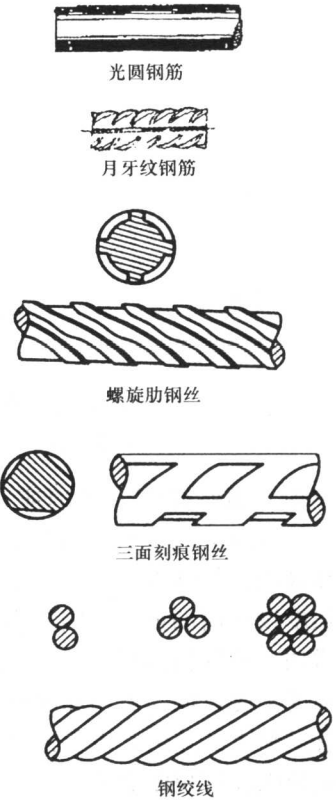


图 1-1 钢筋的各种形式

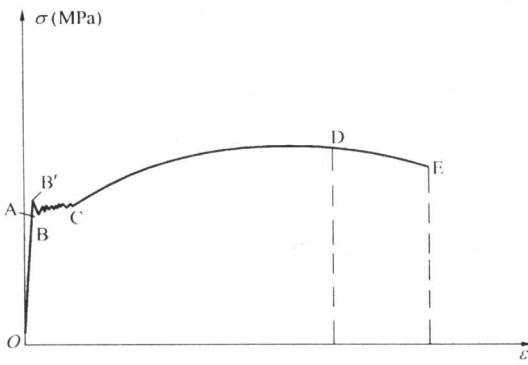


图 1-2 有明显流幅的钢筋的应力-应变曲线

## 二、钢筋的主要力学性能

### （一）钢筋的应力应变曲线

钢筋的力学性能有强度、变形（包括弹性和塑性变形）等。单向拉伸试验是确定钢筋性能的主要手段。经过钢筋的拉伸试验可以看到，钢筋的拉伸应力-应变关系曲线可分为两类：有明显流幅的（图 1-2）和没有明显流幅的（图 1-3）。

图 1-2 表示了一条有明显流幅的典型的应力-应变曲线。在图 1-2 中：OA 为一段斜直线，其应力与应变之比为常数，应变在卸荷

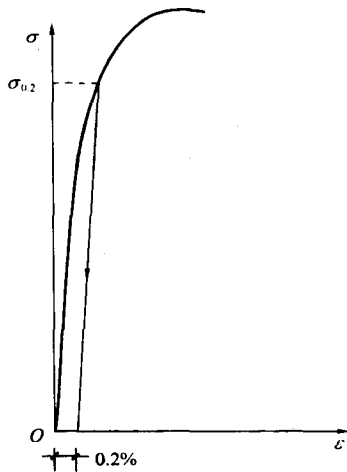


图 1-3 没有明显流幅的钢筋应力-应变曲线

后能完全消失，称为弹性阶段，与 A 点相应的应力称为比例极限（或弹性极限）。应力超过 A 点之后，钢筋中晶粒开始产生相互滑移错位，应变较应力增长稍快，除弹性应变外，还有卸荷后不能消失的塑性应变。到达 B' 点后，钢筋开始屈服，B' 点称为屈服上限，它与加载速度、截面形式、试件表面光洁度等因素有关，通常 B' 点是不稳定的，待 B' 点降至屈服下限 B 点，这时，应力不增加而应变急剧增长，出现水平段 BC。BC 即称之为流幅或屈服台阶，B 点则称屈服点，与 B 点相应的应力称为屈服应力或屈服强度。经过屈服阶段之后，钢筋内部晶粒经调整重新排列，抵抗外荷载的能力又有所提高，CD 段即称为强化阶段，D 点叫做钢筋的极限抗拉强度，而与 D 点应力相应的荷载是试件所能承受的最大荷载称为极限荷载。过 D 点之后，在试件最薄弱处的截面出现横向收缩，截面突然显著缩小，塑性变形迅速增大，即

出现“颈缩现象”，此时应力随之降低，直至 E 点试件断裂。

各级热轧钢筋均有明显的屈服点和屈服台阶，随着强度等级的提高，钢筋的屈服强度和极限抗拉强度越高，屈服台阶缩短。对于有明显流幅的钢筋，一般取屈服强度作为钢筋强度设计值的依据。因为当构件某一截面的钢筋应力达到屈服强度后，其塑性变形将急剧增加，构件将出现很大的变形和过宽的裂缝，以致不能正常使用。另外，钢筋的极限抗拉强度不能过低，若与屈服强度太接近则是危险的，应该使极限抗拉强度与屈服强度之间具有足够大的差值，以保证钢筋混凝土构件在其受力钢筋屈服后，不致因钢筋很快达到极限抗拉强度被拉断而造成结构倒塌。

无明显流幅和屈服点钢筋的应力-应变曲线（图 1-3）也有明显的弹性阶段，其比例极限约相当于极限抗拉强度的 0.65 倍。当应力超过比例极限后即逐渐表现出越来越明显的塑性而弯曲，直到经历极限抗拉强度后被拉断为止。对于这样的硬钢，通常以应力-应变曲线上对应于残余应变为 0.2% 的应力值  $\sigma_{0.2}$ （见图 1-3）作为其屈服极限，称为“条件屈服极限”。《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2002）中预应力钢筋的抗拉强度设计值就是以条件屈服极限为基准确定的，并根据国家标准对消除应力钢丝及钢绞线等预应力钢筋的条件屈服极限应力值的最低限值，统一取  $\sigma_{0.2} = 0.85\sigma_b$ （ $\sigma_b$  为国家标准规定的极限抗拉强度）。

钢筋应力-应变曲线的弹性阶段的斜率即弹性模量是一个相当稳定的物理常数，不同种类钢筋的弹性模量变化不大，其具体值见附录 1-2。

## （二）钢筋的塑性性能

### 1. 伸长率

一定标距长度的钢筋试件在拉断后所残留的塑性应变称为钢筋的伸长率，通常用百分率表示，若取钢筋试件拉伸前的应变测量标距为  $l_1$ ，拉断后这个标距增大为  $l_2$ （图 1-4），则伸长率  $\delta$  为：

$$\delta = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \times 100\% \quad (1-1)$$

同一试件如果基本标距  $l_1$  取值不同, 则按上述方法确定的伸长率将存在差异。这是因为在量测范围内残留应变的分布是不均匀的, 残留伸长的大部分集中在颈缩区段内, 颈缩区段外则较小, 而按式 (1-1) 计算的是平均值, 标距  $l_1$  越大, 得到的伸长率将越小。因此为了使结果具有可比性, 应规定统一的标距长度。例如对热轧钢筋, 通常规定  $l_1$  为试件直径的 5 倍, 所得的伸长率以  $\delta_5$  表示。

钢筋伸长率是衡量钢筋塑性性能的主要指标。伸长率的大小因钢筋的品种而异, 与材料含碳量成反比。含碳量愈低, 钢筋的伸长率愈大, 标志着钢筋的塑性愈好。这样的钢筋不致发生突然的脆性断裂, 因为钢筋断裂前有相当大的变形, 足够给出构件即将破坏的预示。

## 2. 冷弯性能

冷弯是将钢筋在常温下围绕一个规定直径为  $D$  的辊轴 (弯心) 弯转 (图 1-5), 要求在达到规定的冷弯角度时, 钢筋受弯曲部位表面不发生裂纹。冷弯试验中弯转角度愈大、弯心直径  $D$  愈小, 钢筋的塑性就愈好。冷弯试验较受力均匀的拉伸试验能更有效地揭示材质的缺陷, 它是比伸长率试验更为严格的检验。

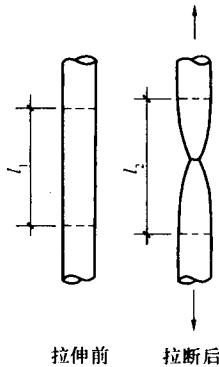


图 1-4 钢筋的拉伸断裂示意

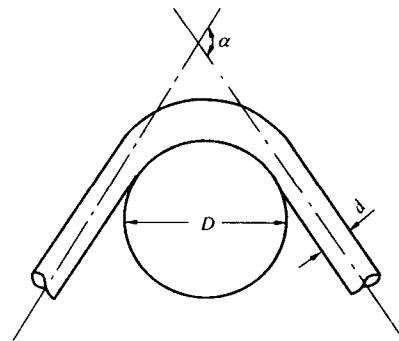


图 1-5 钢筋的冷弯试验

## 三、钢筋的连接

钢筋在工程应用中常需要接长, 即钢筋的连接。钢筋的连接必需满足被连接钢筋所承担的功能要求。即钢筋连接接头的承载能力、变形性能不能比被连接的钢筋差, 接头的存在不应对钢筋与混凝土的共同工作产生明显的不利影响, 同时还应便于施工制作等等。因此钢筋的连接也是钢筋的基本受力性能之一。

热轧钢筋常用的连接方法有绑扎搭接、焊接和机械连接三种类型。

绑扎搭接是将两根被连接的钢筋搭接一定的长度并用细钢丝捆绑成型后置于混凝土中。这种连接的被连接钢筋是通过被混凝土粘结锚固来传递内力的。这种连接的构造简单, 施工方便, 在工程中应用相当广泛。对其机理和应用原则, 将在第三节中进一步详述。

钢筋的机械连接是用套筒将两根钢筋连接起来 (图 1-6), 利用套筒和钢筋之间的机械咬合力来传递内力。主要形式有: 挤压套筒连接; 锥螺纹套筒连接; 镦粗直螺纹连接; 辊轧直螺纹连接 (剥肋与不剥肋) 等。钢筋机械连接型式的选用及质量控制要求应遵照《钢筋机械连接通用技术规程》(JGJ 107—2003) 的规定。这种连接质量稳定可靠, 操作简单,



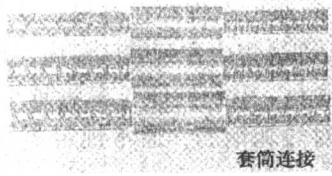


图 1-6 钢筋的机械连接

施工速度快，适用范围广。

钢筋焊接方法很多，包括闪光对接焊、电弧焊、电渣压力焊、气压焊等。焊接的选择应考虑钢筋的可焊性。钢筋的可焊性取决于钢材中碳及各种合金元素的含量。碳当量较高时可焊性就较差，碳当量超过 0.55% 的钢筋就难以焊接。前面所述的钢筋品种中热轧钢筋可焊，而消除应力钢丝及钢绞线则不可焊。但即使是可焊的钢筋，也应根据不同品种钢筋可焊性的差别，满足《钢筋焊接及验收规程》(JGJ 18—2003) 的要求。选择合适的焊接工艺、焊接接头类型和质量控制体系。焊接连接的优点是传力直接，节省钢材，成本低。在质量有保证的前提下，焊接是一种性能很好的连接方法。但焊接的缺点恰恰是影响焊接质量的因素多，保证质量的难度较大。例如，焊工的技艺水平、施焊时的气候条件、施工环境、质量管理水平及检测手段等都会对焊接质量产生明显的影响。焊接的常见施工缺陷有虚焊、夹渣、气泡、焊接裂纹等，如不能在钢筋被混凝土隐蔽之前及时检验发现并处理矫正，则势必成为工程的危险隐患。因此，对焊接连接采取严格有效的质量保证体系尤为重要。

必须注意，不论采用何种连接形式，接头的受力性能都难以做到和被连接钢筋的性能完全一致，同时接头的存在可能影响结构构件在接头处的截面状态，如钢筋的净距减小，影响混凝土浇筑振捣的密实性；钢筋保护层厚度变小，钢筋的粘结锚固受影响等等，从而使接头处很可能成为薄弱环节。因此，在设计和施工中，对于钢筋接头必须注意：尽可能将接头布置在结构构件的受力较小处，并将钢筋接头适当错开，以及必要时对钢筋接头比较集中的区段采取增设构造钢筋以减少接头的不利影响等等。在这些方面，针对不同的连接方式，有关规范都有详尽的构造规定，应注意遵守执行。

以上所述的连接方法，都不适用于消除应力钢丝、钢绞线等高强度预应力钢筋。这些预应力钢筋需要连接时，必须采用专门的连接器。

#### 四、混凝土结构对钢筋性能的要求

以上内容，从钢筋的品种和形式，主要力学性能到钢筋连接，对钢筋的基本性能已经作了比较全面的论述。概括起来，钢筋的性能包括强度（屈服强度和极限抗拉强度）、塑性性能（伸长率和冷弯性能）、锚固性能（表面形状）、连接性能（可焊性等）。此外，前面没有论及的还有疲劳性能、抗腐蚀性能和热稳定性等，在选择钢筋时，根据工程的实际情况，也应予以关注。

混凝土结构对钢筋性能的最基本的要求是强度和塑性，应在保证强度和塑性性能的前提下综合考虑其他需要考虑的各项性能。有效地利用高强度钢筋可以减少钢筋用量，节约钢材，而且方便构造与施工。同时高强度钢筋的强度价格比往往较高，故可收得较好的综合经济效益。

在结构设计中通常将结构或材料的变形和耗能能力称为结构或材料的延性。延性好的结构或材料在破坏以前会产生很明显的变形而使破坏具有预兆，因此比较安全。反之延性差的结构或材料的破坏往往是在没有明显变形的情况下突然发生的。对材料来说，这种破坏是脆性的，对结构来说可能发生突然倒塌，因此比较危险。对钢筋来说，伸长率是代表其延性好坏的主要指标。伸长率大则延性好。对混凝土结构来说，钢筋的延性对结构或构件的破坏形态具有重要影响，因此对反应钢筋延性的伸长率等指标有一定的要求。