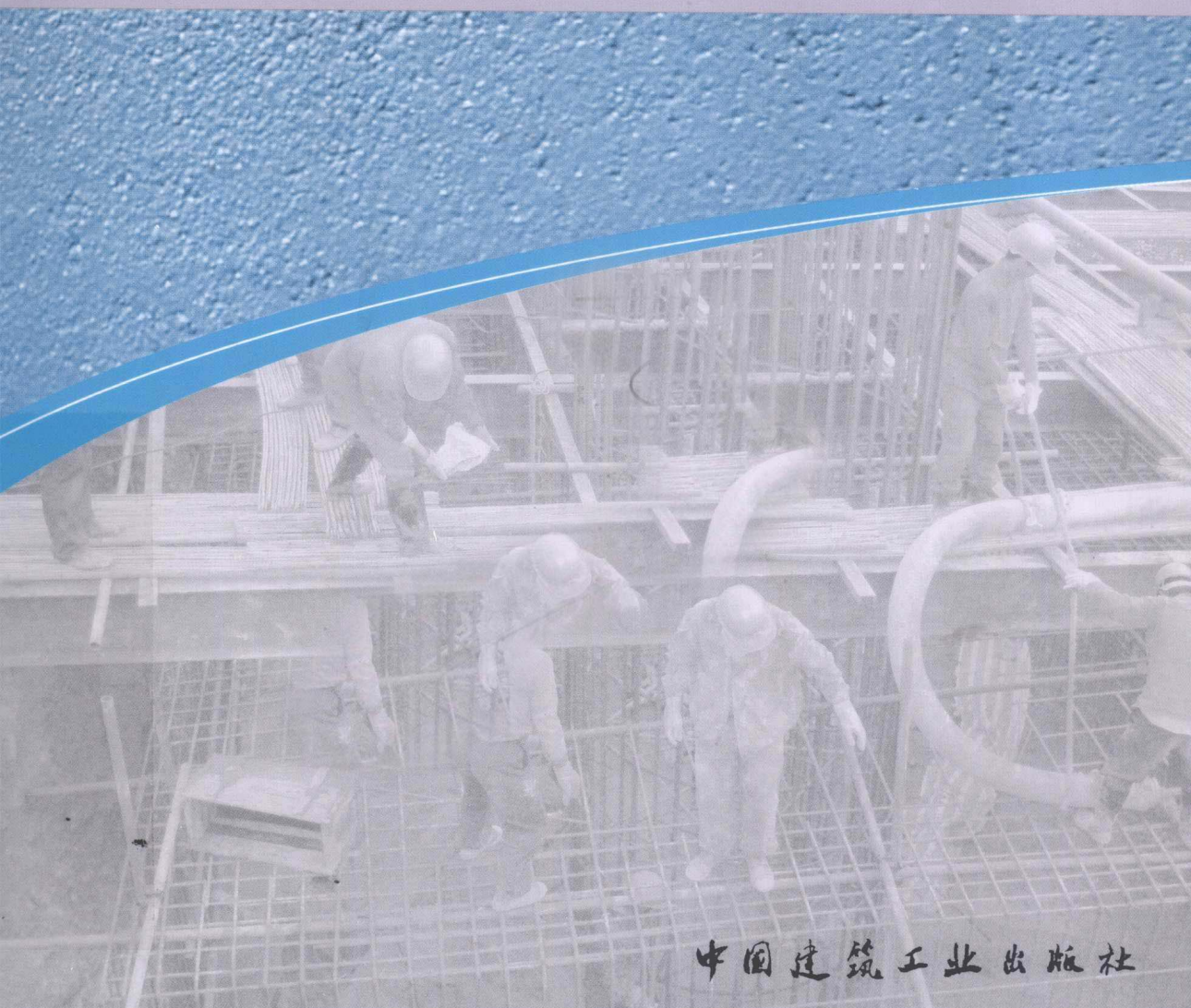


高等学校道路与桥梁专业规划教材

混凝土结构设计原理

杨霞林 丁小军 主编



中国建筑工业出版社

高等学校道路与桥梁专业规划教材

混凝土结构设计原理

杨霞林 丁小军 主编



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

混凝土结构设计原理/杨霞林等主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 8

高等学校道路与桥梁专业规划教材

ISBN 978-7-112-13426-7

I. ①混… II. ①杨… III. ①混凝土结构-结构设计-高等学校-教材 IV. ①TU370.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 148217 号

本书是根据全国高等院校土木工程专业指导委员会对土木工程专业本科教育的培养目标和培养方案及教学大纲的基本要求, 为满足土木工程专业的教学需要而编写。全书共十章, 对钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构设计计算原理作了详尽的介绍, 第一章至第八章主要按照我国建筑行业现行规范《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010) 编写、第九章(容许应力法)主要按照铁路行业现行规范《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》(TB 10002.3—2005)编写, 第十章(预应力混凝土结构)主要按照公路行业现行规范《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)编写, 为突出应用及便于学习, 本书在各章中安排有计算例题、小结、思考题、习题等内容。

本书为高等学校土木工程专业的教学用书, 也可供有关工程技术人员参考。

* * *

责任编辑: 郭 栋 张 磊

责任设计: 张 虹

责任校对: 陈晶晶 刘 钰

高等学校道路与桥梁专业规划教材

混凝土结构设计原理

杨霞林 丁小军 主编

*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 21 字数: 520 千字

2011 年 8 月第一版 2011 年 8 月第一次印刷

定价: 36.00 元

ISBN 978-7-112-13426-7

(21126)

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)

前 言

本书是根据全国高等院校土木工程专业指导委员会审定通过的教学大纲，结合本校实际，为满足土木工程专业的教学需要而编写。

考虑到土木类各行业所使用的规范存在较大差异的实际情况，本着求大同，舍小异，注重基本原理讲述，避免不同行业规范混用，适当照顾不同行业规范的原则。本书第一章至第八章主要按照我国建筑行业现行规范《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)编写、第九章主要按照铁路行业现行规范《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》(TB 10002.3—2005)编写，第十章主要按照公路行业现行规范《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)编写。在编写中注意了有关规范已修改的内容，适当反映国内较为成熟的新的科研成果。在内容编排上力求各章相互独立，便于教师组织教学。书中带*的章节，教学中可安排成自学内容。

本书编写人员及分工为：绪论、第一、九、十章由杨霞林编写；第二、五、六、七、八章由丁小军编写；第三、四章及附表由林丽霞编写。全书由杨霞林、丁小军统稿主编，赵建昌教授主审。

本书在编写过程中参考了国内近年来正式出版的相关规范和教材等，特此向有关编者表示衷心的感谢。

目 录

绪论	1
§ 0.1 混凝土结构的一般概念	1
§ 0.2 钢筋混凝土结构的主要优缺点	2
§ 0.3 混凝土结构的应用及发展简况	3
§ 0.4 学习本课程需要注意的几个问题	5
思考题	5
第一章 钢筋和混凝土的力学性能	6
§ 1.1 钢筋	6
§ 1.2 混凝土	11
§ 1.3 钢筋与混凝土之间的粘结	23
小结	28
思考题	28
第二章 钢筋混凝土结构设计计算原则	30
§ 2.1 概述	30
§ 2.2 概率极限状态设计法的基本概念	31
§ 2.3 极限状态设计表达式	36
小结	42
思考题	42
习题	43
第三章 受弯构件正截面承载力计算	44
§ 3.1 概述	44
§ 3.2 一般构造要求	45
§ 3.3 受弯构件正截面的受力性能	48
§ 3.4 受弯构件正截面承载力计算的基本原则	50
§ 3.5 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	53
§ 3.6 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	62
§ 3.7 T形截面受弯构件正截面承载力计算	69
小结	78
思考题	79
习题	80
第四章 受弯构件斜截面承载力计算	83
§ 4.1 概述	83
§ 4.2 影响斜截面受剪承载力的主要因素	84

§ 4.3	斜截面受力特点及受剪破坏形态	87
§ 4.4	斜截面受剪承载力计算	90
§ 4.5	斜截面受剪承载力计算方法	93
§ 4.6	构造要求	98
	小结	107
	思考题	108
	习题	108
第五章	受压构件	110
§ 5.1	受压构件的分类及一般构造要求	110
§ 5.2	轴心受压构件	113
§ 5.3	矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	121
§ 5.4	工字形截面偏心受压构件正截面承载力计算	143
* § 5.5	双向偏心受压构件正截面承载力计算	149
* § 5.6	偏心受压构件斜截面受剪承载力计算	152
	小结	153
	思考题	154
	习 题	155
第六章	受拉构件	156
§ 6.1	概述	156
§ 6.2	轴心受拉构件正截面承载力计算	156
§ 6.3	偏心受拉构件正截面承载力计算	157
§ 6.4	偏心受拉构件斜截面受剪承载力计算	161
§ 6.5	受拉构件的构造要求	162
	小结	162
	思考题	162
	习题	163
第七章	受扭构件	164
§ 7.1	概述	164
§ 7.2	纯扭构件	165
§ 7.3	弯剪扭构件	170
§ 7.4	压-弯-剪-扭构件	179
	小结	180
	思考题	180
	习题	180
第八章	裂缝宽度和变形验算	182
§ 8.1	概述	182
§ 8.2	裂缝宽度验算	182
§ 8.3	受弯构件变形(挠度)验算	190
§ 8.4	混凝土结构的耐久性	195

小结	199
思考题	200
习题	200
第九章 容许应力法	201
§ 9.1 容许应力法的基本概念	201
§ 9.2 受弯构件抗弯强度的计算	202
§ 9.3 受弯构件抗剪强度的计算	214
* § 9.4 偏心受压构件的计算	220
* § 9.5 轴心受压构件的计算	226
小结	228
思考题	229
习题	230
第十章 预应力混凝土结构	231
§ 10.1 概述	231
§ 10.2 预加应力的方法与设备	238
§ 10.3 预应力混凝土结构的材料	244
§ 10.4 张拉控制应力与预应力损失	246
§ 10.5 预应力混凝土受弯构件的应力计算	257
§ 10.6 预应力混凝土受弯构件的承载力计算	264
§ 10.7 预应力混凝土受弯构件的抗裂性验算	269
§ 10.8 变形计算	271
§ 10.9 端部锚固区计算	273
§ 10.10 预应力混凝土简支梁设计	277
§ 10.11 预应力混凝土简支梁计算示例	286
§ 10.12 无粘结预应力混凝土构件的简介	309
§ 10.13 部分预应力混凝土构件的简介	311
小结	313
思考题	314
习题	314
附录	316
附录 1 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2011) 附表	316
附录 2 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》 (JTG D 62—2004) 附表	323
参考文献	328

绪论

§ 0.1 混凝土结构的一般概念

一、混凝土结构的定义与分类

以混凝土为主要承载材料制成的结构称为混凝土结构，包括钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构和素混凝土结构等。配置有受力的普通钢筋、钢筋网或钢骨架的混凝土结构称为钢筋混凝土结构；配置有受力的预应力钢筋，再经过张拉或其他方法建立预加应力的混凝土结构称为预应力混凝土结构；无钢筋或不配置受力钢筋的混凝土结构称为素混凝土结构。本教材着重讲述钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。

二、配筋的作用

钢筋混凝土是由两种力学性能不同的材料—钢筋和混凝土结合成整体，共同发挥作用的一种建筑材料。

混凝土是一种人造石料，其抗压强度很高，而抗拉强度很低（约为抗压强度的 $1/18 \sim 1/8$ ）。钢材的抗拉和抗压能力都很强。为了充分利用材料的性能，把混凝土和钢筋这两种材料结合在一起共同工作，使混凝土主要承受压力，钢筋主要承受拉力以满足工程结构的使用要求。

图 0-1 中绘有两根截面尺寸、跨度、混凝土强度等级完全相同的简支梁，一根为素混凝土梁，另一根则是在梁的受拉区配有适量钢筋的钢筋混凝土梁。

由试验可知：素混凝土梁由于混凝土的抗拉能力很小，在荷载作用下，受拉区边缘混凝土一旦开裂，梁瞬间脆断而破坏，破坏前变形很小，没有预兆，属于脆性破坏类型。由此可见，素混凝土梁的承载能力是由混凝土的抗拉强度控制的，而受压区混凝土的抗压强度则远未被充分利用。对于在受拉区配置适量钢筋的钢筋混凝土梁，当受拉区混凝土开裂后，梁中和轴以下受拉区的拉力主要由钢筋来承受，中和轴以上受压区的压力仍由混凝土承受。梁受拉区出现裂缝的荷载即梁的抗裂荷载虽然比素混凝土梁要增大些，但增大的幅度不大；由于钢筋的抗拉能力和混凝土的抗压能力都很大，即使受拉区的混凝土开裂后梁还能继续承受相当大的荷载，直到受拉钢筋应力达到屈服强度，随后荷载仍可略有增加致使受压区混凝土被压碎，梁才告破坏，破坏前变形较大，有明显预兆，属于延性破坏类型。因此，钢筋混凝土梁的承载能

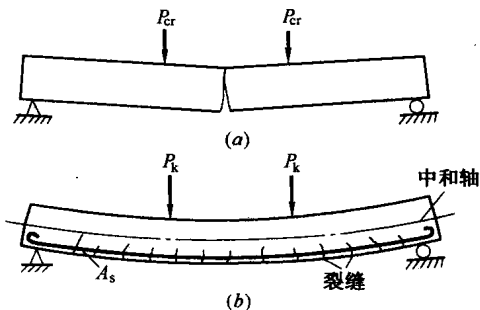


图 0-1 简支梁受力破坏示意图
(a) 素混凝土梁；(b) 钢筋混凝土梁

力和变形能力较素混凝土梁提高很多，并且钢筋和混凝土两种材料的强度都能得到较充分的利用。

与素混凝土梁相比，钢筋混凝土梁的承载能力提高很多，但对抵抗裂缝的能力提高并不多。因此，在使用荷载下，钢筋混凝土梁一般是带裂缝工作的。当然，其裂缝宽度应控制在允许限值内。

钢筋和混凝土这两种物理力学性能不相同的材料之所以能有效地结合在一起并共同工作，是由于：

1. 钢筋和混凝土之间具有可靠的粘结力，使两者能相互牢固地结成整体，亦即在荷载作用下，钢筋与相邻的混凝土能协调地共同变形、共同受力。同时，由于钢筋的弹性模量一般远大于混凝土的弹性模量（5~10倍），因而能使钢筋充分地发挥其强度。

2. 钢筋和混凝土的温度线膨胀系数大致相同 [钢材约为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ；混凝土约为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]，当温度变化时，在钢筋混凝土构件内只产生较小的温度应力，因而不致破坏钢筋和相邻混凝土间的粘结力。

3. 钢筋被混凝土所包裹，并且混凝土具有弱碱性，从而防止了钢筋的锈蚀，保证了结构的耐久性。

§ 0.2 钢筋混凝土结构的主要优缺点

一、钢筋混凝土结构的优点

钢筋混凝土除了如上所述能合理地利用两种材料的性能外，还有下列主要优点：

1. 可以就地取材

砂、石在钢筋混凝土的体积中所占比重大，一般可以就地就近取材，因而可以减少材料的运输费用，降低建筑造价。在工程废料（如矿渣、粉煤灰等）比较多的地区，可将工业废料制成人造骨料用于混凝土中，这不但可以解决废料处理问题，改善环境污染，而且还可以减轻结构自重。

2. 用材合理

钢筋混凝土结构合理地利用了钢筋（抗拉性能好）和混凝土（抗压性能好）两种材料的性能，与钢结构相比，可降低造价。

3. 耐久性好

钢筋混凝土结构的强度一般不仅不随时间而降低，而且还不断增长（混凝土一年龄期的强度约为28d强度的1.5倍，当30年龄期时，可达2倍以上）。混凝土抗大气侵蚀的性能好，且钢筋又被混凝土所包裹而不致锈蚀，所以不像钢结构那样，需要经常保养和维修。

4. 耐火性好

由于混凝土的导热性能较差，钢筋为其所包裹，且又有足够的保护厚度，在火灾中不致使钢材很快达到软化的温度而造成结构整体破坏。所以，与钢结构相比，钢筋混凝土的耐火性能好。对经常遭受高温的结构，还可根据所受的温度，采用不同的耐热混凝土。

5. 整体性强

钢筋混凝土特别是现浇的钢筋混凝土结构具有较好的整体性，故抗震性能较好。并可根椐设计控制其延性，所以对在震区的建筑物，有其重要的意义；又由于整体性强，所以刚度较大，在使用荷载作用下，仅产生较小的变形，故被有效地应用于对变形要求较严的各种建筑物。

6. 可塑性好

钢筋混凝土可根据设计要求，浇筑成各种形状和尺寸的结构，特别适用于建造外形复杂、新颖的大体积结构和空间薄壳结构等。

二、钢筋混凝土结构的缺点

1. 自重大

钢筋混凝土结构自重较大，这对于大跨度结构、高层结构以及抗震结构都是不利的。采用轻质高强度混凝土及预应力混凝土，可以有效地克服这一缺点。

2. 抗裂性差

混凝土容易开裂。配置钢筋后虽可大大提高构件的承载能力，但抗裂荷载提高甚微，故钢筋混凝土结构在使用荷载下一般带裂缝工作，因此，必要时可采用预应力混凝土，以提高其抗裂性。

3. 费工

需要支模、绑钢筋、浇筑、养护、拆模，工期较长，费工较多，且施工受季节的限制。建造现浇的钢筋混凝土结构需耗用的模板材料数量大，若采用工具式钢模板、滑模和蒸汽养护等工业化施工方法，在一定程度上可以改善这一缺点。

此外，钢筋混凝土结构的补强、加固及改建比较困难。混凝土的保温隔热和隔声性能也较差。

§ 0.3 混凝土结构的应用及发展简况

钢筋混凝土结构出现至今约有 160 多年历史。它和砖石、木、钢结构相比，是一种比较年轻的结构形式。由于它在物理力学性能及材料来源等方面有许多优点，所以其发展速度很快，应用也最广泛。特别是预应力混凝土出现以来，钢筋混凝土结构已经发展成为国民经济所有领域工程建设中不可缺少的结构形式。

随着高强度钢筋、高强度高性能混凝土以及高性能外加剂和混合材料的研制使用，高强度高性能混凝土的应用范围不断扩大。轻质混凝土、加气混凝土、陶粒混凝土及利用工业废渣的“绿色混凝土”等，不但改善了混凝土的性能，而且对节能和保护环境具有重要意义。此外，防射线、耐磨、耐腐蚀、防渗透、保温等特殊需要的混凝土以及智能型混凝土及其结构也在研究中。混凝土结构的应用范围也在不断扩大，已从工业与民用建筑、交通设施、水利水电建筑和基础工程扩大到了近海工程、海底建筑、地下建筑、核电站安全壳等领域，甚至已开始构思和试验用于月面建筑。随着轻质高强度材料的使用，在大跨度、高层建筑中的混凝土结构越来越多。

我国在高层建筑和多层框架中大多采用混凝土结构。在工业与民用建筑中已较广泛地

采用定型化、标准化的装配式钢筋混凝土构件。电视塔、水塔、冷却塔、烟囱、贮罐、筒仓等特殊构筑物也普遍采用了钢筋混凝土和预应力混凝土。在铁路、公路、城市的立交桥、高架桥、地铁隧道，以及水利港口等交通工程中用钢筋混凝土建造的水闸、水电站、船坞和码头已是星罗棋布。例如，在城市建设中，上海金茂大厦建筑总高度为 420.5m，主楼地上为 88 层，地下 3 层，为框筒结构体系，核心筒为现浇钢筋混凝土，外框为钢结构与混凝土结构组合成巨型框架，混凝土施工采用超高层泵送商品混凝土技术。在桥梁工程中，荆州长江大桥全桥总长为 4397.6m，其北汉通航孔桥为主跨 500m 的预应力混凝土斜拉桥。在水利工程中，我国的小湾电站混凝土拱坝，最大坝高 294.5m。

以下就材料、结构与施工和设计理论三个方面，来简要说明钢筋混凝土的发展现状和趋势。

一、材料方面

高强、轻质和高耐久性的高性能混凝土是混凝土材料发展的方向，这对发展高层建筑、高耸结构、大跨结构有重要意义。近年来，国内外在高层建筑中采用的混凝土强度已达 C80~C100。具有自身诊断、自身控制、自身修复等功能的机敏性高性能混凝土，如自密实混凝土和内养护混凝土，得到越来越多的研究和重视。为了减轻结构自重，各国都在大力发展各种轻质混凝土，如加气混凝土，陶粒混凝土等。为了改善混凝土抗拉性能差、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也发展迅速，目前研究较多的钢纤维、耐碱玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维等。其他各种特殊性能混凝土，如微膨胀混凝土、耐腐蚀混凝土、聚合物混凝土以及水下不分散混凝土等的应用，可提高混凝土的抗裂性、耐磨性、抗渗和抗冻能力等，对混凝土的耐久性十分有利。

高强、防腐、较好延性和良好的粘结锚固性能是钢筋的发展方向。我国用于普通混凝土结构的钢筋强度已达 $500\text{N}/\text{mm}^2$ ，预应力混凝土结构中已采用强度为 $1960\text{N}/\text{mm}^2$ 的钢绞线。为了提高钢筋的防腐性能，带有环氧树脂涂层的热轧钢筋和钢绞线已开始在某些有特殊防腐要求的工程中应用。

二、结构与施工方面

在一般的工业与民用建筑中，已广泛采用定型化、标准化的钢筋混凝土和预应力混凝土构件，它促进了钢筋混凝土结构设计的标准化、制造的工厂化和安装施工的机械化。随着建筑工业化的发展，结构设计正在走向工业化的建筑体系，为进一步加快建设速度，降低造价和保证施工质量创造了条件。另一个发展动向是向大跨和高空发展。

三、设计理论方面

目前，在建筑结构中已应用基于概率论和数理统计分析的可靠度理论，使极限状态设计方法向着更为完善、更为科学的方向发展。考虑混凝土非线性变形的计算理论已经有了很大的进展，并在梁板、框架结构及大型工程结构的分析中得到了应用。随着对混凝土变形性能的深入研究和电子计算机的应用，钢筋混凝土构件的计算已开始使用将强度、变形、延性贯串起来的全过程分析方法，并从个别构件分别计算发展为对整个结构的整体工作的分析方法。由于将电子计算机、有限元方法和现代测试技术引入到钢筋混

凝土的理论 and 试验研究中, 使得钢筋混凝土的计算理论和设计方法正日趋完善, 并向更高阶段发展。

§ 0.4 学习本课程需要注意的几个问题

1. 本课程着重讨论钢筋混凝土构件的受力性能, 这在本质上相当于钢筋混凝土的“材料力学”。它与材料力学有很多相似之处, 又有许多不同的地方。两者都要通过几何、物理和平衡关系来建立基本方程, 这是相同的。但材料力学主要研究单一、匀质、连续、弹性(或理想弹塑性)材料的构件; 而本课程研究的是由钢筋和混凝土两种材料所组成的构件, 而且混凝土是非均匀、非连续、非弹性材料。由于钢筋混凝土是由两种力学性能很不相同的材料所组成, 如果两种材料在强度搭配和数量比值上的变化超过一定范围或界限, 会引起构件受力性能的改变, 这也是钢筋混凝土构件所具有的特点, 学习时应注意。

2. 钢筋混凝土构件和计算方法与其他学科一样, 是建立在科学试验的基础之上的。但由于混凝土材料的物理力学性能的复杂性, 目前还没有建立起完善的强度理论, 因而对试验的依赖性就更强。因此, 学习过程中要重视构件的试验研究, 了解试验中的规律性现象, 理解建立公式时所采用的基本假定的试验依据, 应用公式时要注意适用范围和限制条件。

3. 本课程不仅要解决构件承载力和变形等计算问题, 而且要进一步解决构件的设计问题, 包括结构方案、构件选型、材料选择和配筋构造等。这是一个综合性的问题。对同一问题, 往往有多种可能的解决办法, 这就要综合考虑使用要求、材料供应、施工条件和经济效益等各种因素, 从中选出较优的方案。要注意培养对多种因素进行综合分析的能力。

4. 构造处理是长期科学实验和工程实践经验的总结, 是对计算必不可少的补充。在设计结构和构件时, 计算和构造是同等重要的。因此, 要充分重视对构造要求的学习, 要着眼于理解, 切忌死记硬背, 注意弄清其中的道理。

5. 本课程还涉及有关规范。为了贯彻国家的技术经济政策, 保证设计质量, 加快施工进度, 国家颁布了各种结构设计规范。这些规范反映了我国多年来钢筋混凝土的科技水平和丰富的工程经验, 并且吸收了国际上的一些先进成果。在学习过程中要理解、熟悉和应用它。

6. 本课程的实践性很强, 有些内容, 如梁、板、柱中的钢筋布置和模板构造, 预应力的张拉方法及各种锚具、夹具等, 若不进行现场参观是很难掌握的。因此在学习过程中要有计划地到施工现场、预制构件厂参观, 留心观察已有建筑物的结构布置、受力体系和构造细节, 积累实际的感性知识, 这对于学好本课程将大有益处。

思 考 题

- 【0-1】 钢筋混凝土结构有哪些优点和缺点?
- 【0-2】 钢筋混凝土结构是由两种物理力学性能不同的材料组成的, 为什么能共同工作?
- 【0-3】 学习钢筋混凝土结构要注意哪些问题?

第一章

钢筋和混凝土的力学性能

§ 1.1 钢筋

一、钢筋的强度和变形

钢筋混凝土结构所用的钢筋按其力学性能可以分成两大类：软钢和硬钢。软钢的力学特点是具有明显的流幅，其拉伸时的典型应力-应变曲线如图 1-1 所示。硬钢的力学特点是没有明显的流幅，其拉伸时的典型应力-应变曲线如图 1-2 所示。

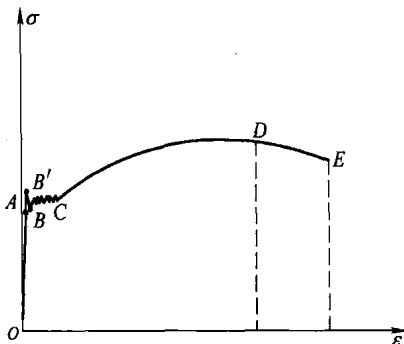


图 1-1 有明显流幅钢筋的应力-应变曲线

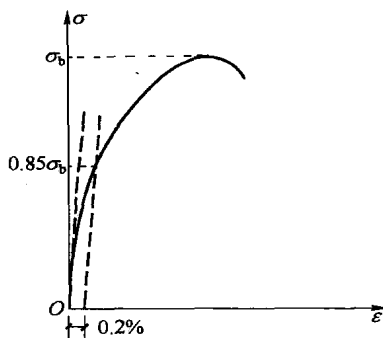


图 1-2 无明显流幅钢筋的应力-应变曲线

在图 1-1 中 A 点以前，应力与应变为直线关系，A 点对应的应力称为比例极限。钢筋 OA 段上具有理想的弹性性质。这时的应变在卸荷后可以完全恢复。过 A 点以后，应变较应力增长为快，到达 B' 点后钢筋开始塑流，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，这时应力基本不增加而应变急剧增长，从而产生相当大的纯塑性变形，曲线接近水平线，这种现象称为“屈服”或“流动”。曲线延伸至 C 点，B 点到 C 点的水平距离的大小称为“流幅”或“屈服台阶”。有明显流幅的热轧钢筋的屈服强度是按屈服下限确定的。若在应力达到 B 点以前卸荷，应变中的绝大部分仍能完全恢复，故 B 点称为“弹性极限”。超过 C 点后，钢筋的应力重新开始增长，说明钢筋的抗拉能力又有所提高，但这时曲线的斜率远比弹性阶段小，而且随应力的增长越来越小，直到 D 点处钢筋达到了极限抗拉强度。CD 段称为钢筋的“强化阶段”。过了 D 点以后，试件在某个薄弱部位的截面将突然显著缩小，应变急剧增长，发生“颈缩”现象，达到 E 点试件发生断裂。产生颈缩现象后，试件在该处的截面面积缩小，因此材料所受的实际应力仍在不断增长。但若按初始截面计算，则应力是在不断降低的。从而出现了应力-应变曲线中的下降段 DE。

钢筋的受压性能试验表明,在达到屈服强度之前,受压钢筋也具有理想的弹性性质,而且屈服强度与受拉时基本相同。在分析计算中,可以认为比例极限和屈服强度接近相等,而取钢筋的屈服强度作为可以利用的应力上限,并把它作为检验有明显屈服点的钢筋质量的主要强度指标。这是因为当钢筋应力达到屈服以后,将产生很大的塑性变形,而且在卸荷时这部分变形是不可恢复的,这将使构件出现很大的变形和不可闭合的裂缝,以致不能使用。对于没有明显流幅或屈服点的预应力钢筋,为了和国家标准相一致,《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010,以下简称《规范》)规定在构件承载力设计时,取极限抗拉强度 σ_b 的85%作为条件屈服强度,如图1-2所示。对于抗震结构,设计中要求结构在强震下“裂而不倒”,钢筋应力的利用可考虑进入强化阶段,但对钢筋抗拉强度与屈服强度的比值(强屈比)有一定的要求,一般不小于1.25。

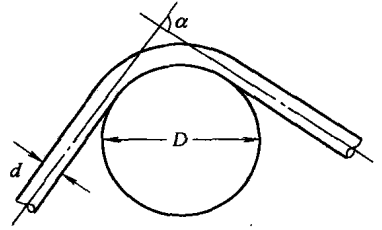


图 1-3 钢筋的弯转

在钢筋混凝土结构中,钢筋除了要有足够的强度外,还应具有一定的塑性变形能力,即钢材应力超过屈服点以后,变形过程较长,或钢材具有可以弯折成很小的角度而不致断裂的性能。这通常以钢筋的伸长率 δ 及冷弯性能来表示。伸长率即试件断裂后的伸长值与原长的比率。伸长率越大塑性越好。冷弯试验则是把钢筋沿一个直径为 D 的弯芯进行弯转(图1-3),以其不发生裂纹、鳞落或断裂而能弯转的角度最小限值,作为衡量钢筋是否有足够塑性的标准。弯芯的直径 D 越小,弯转角 α 越大,则说明钢筋的塑性越好。为了使钢筋在断裂前有足够的伸长,保证钢筋混凝土结构能够给出即将破坏的预告,需要根据强度和塑性两个指标选择钢筋品种,以满足使用要求。

国家标准规定了各种钢筋所必须达到的伸长率的最小值(比如, δ_{10} 和 δ_5 分别表示标距为 $10d$ 和 $5d$ 时伸长率的最小值)以及冷弯时相应的弯芯直径及弯转角的要求,有关参数可参照相应的国家标准。

二、钢筋的种类和级别

混凝土结构中使用的钢材,按其生产加工工艺和力学性能的不同可以分为热轧钢筋、冷加工钢筋、预应力钢丝和预应力螺纹钢筋(精轧螺纹钢筋)。

用于钢筋混凝土结构的国产普通钢筋可采用热轧钢筋,用于预应力混凝土结构的国产预应力钢筋可采用预应力钢丝、钢绞线以及预应力螺纹钢筋。《规范》规定,混凝土结构应根据对强度、延性、连接方式、施工适应性等的要求,选用下列牌号的钢筋:纵向受力普通钢筋宜采用HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500钢筋,也可采用HPB300、HRB335、HRBF335和RRB400钢筋;梁、柱纵向受力普通钢筋应采用HRB400、HRB500、HRBF400、HRBF500钢筋;箍筋宜采用HRB400、HRBF400、HPB300、HRB500、HRBF500钢筋,也可采用HRB335、HRBF335钢筋;预应力筋宜采用钢丝、钢绞线和预应力螺纹钢筋。

热轧钢筋是低碳钢、普通低合金钢或细晶粒钢在高温状态下轧制而成。热轧钢筋根据其强度的高低,分为HPB300(I级),HRB335、HRBF335(II级),HRB400、HRBF400和RRB400(III级),HRB500、HRBF500(IV级)四种。各钢筋后的数值代表

该钢筋的强度标准值。HPB300 为碳素热轧光圆钢筋，HRB335、HRB400 和 HRB500 为普通低合金热轧带肋钢筋，HRBF335、HRBF400 和 HRBF500 为细晶粒热轧带肋钢筋，RRB400 钢筋为余热处理带肋钢筋。热轧钢筋的应力-应变曲线有明显的屈服点和流幅，断裂时有“颈缩”现象，伸长率比较大。

热轧钢筋按其外形特征可分为光圆钢筋和带肋钢筋。钢筋表面形状的选择取决于钢筋的强度。为了使钢筋的强度能够充分的利用，强度越高的钢筋要求与混凝土粘结的强度越大。提高粘结强度的办法是将钢筋表面轧成有规律的凸出花纹，即采用变形钢筋。光圆钢筋粘结强度较低，带肋钢筋由于凸出的肋与混凝土的机械咬合作用而具有较高的粘结强度。过去长期采用的是纵肋与横肋相交的螺纹形和人字形，为了克服这种钢筋在轧制过程中易卡辊的缺点和避免纵横肋相交处的应力集中现象，近年来已开始采用一种纵肋与横肋不相交的月牙纹钢筋。

预应力钢丝是指光面和螺旋肋的中强度预应力或消除应力的钢丝。光面钢丝一般以多根钢丝组成钢丝束或由若干根钢丝扭结成钢绞线的形式应用。螺旋肋钢丝与混凝土之间的粘结性能好，适用于先张法预应力混凝土结构。预应力螺纹钢筋是在整根钢筋上轧有外螺旋纹的大直径、较高强度、高尺寸精度的钢筋。

三、钢筋的冷加工

为了节约钢材，常用冷拉或冷拔的方法来提提高热轧钢筋的强度。

1. 钢筋的冷拉

冷拉是将钢筋拉到超过屈服强度的某一应力，如图 1-4 中的 k 点。这时钢筋已产生较大的塑性变形，卸荷至零时有残余应变 ω_1 。如立即重新加荷，应力-应变曲线将沿 o_1kc 进行，屈服强度提高至 k 点，这种现象称为钢筋的“冷拉强化”。如冷拉至 k 点卸荷后，经过一段时间后再施加拉力，则应力-应变曲线将沿 $o_1k'd'$ 进行，屈服强度提高至 k' 点，这一现象称为“冷拉时效”。由图可见，经冷拉时效后钢筋的强度有明显提高，但延伸率则减小了，塑性降低。合理的选择 k 点可使强度有所提高，而又保持一定的塑性。 k 点的应力称为冷拉控制应力，对应的应变为冷拉率。冷拉时若同时控制冷拉应力及冷拉率则称为双控，只控制一项时称为单控，为保证质量，应尽量采取双控。冷拉时效和温度有很大关系，例如：HPB300 钢筋在常温时需 20d；在 100°C 时，仅需 2h 即可完成。但若加温至

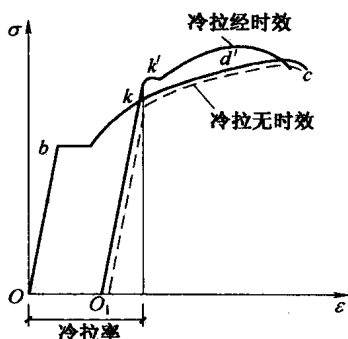


图 1-4 钢筋冷拉后的应力-应变曲线

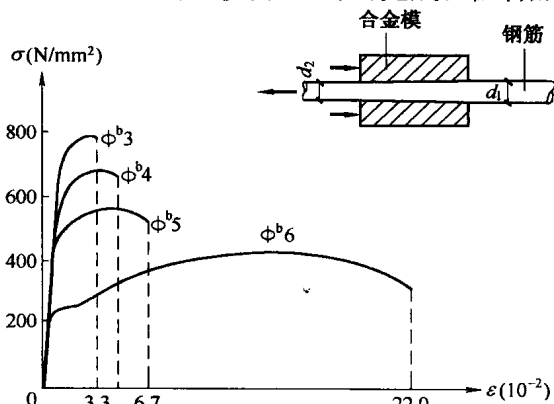


图 1-5 冷拔低碳钢丝的应力-应变曲线

450℃时，强度反而有所降低而塑性性能却有所增加。当加温至 700℃时，钢材会恢复到冷拉前的力学性能。为了避免钢材在焊接时产生高温使钢筋软化，需要焊接的冷拉钢筋都是先焊好再进行冷拉。还需要指出的是：冷拉只能提高钢筋的抗拉强度，而其受压屈服强度反而降低，这种现象称为“包兴格效应”。所以，冷拉钢筋不宜用作受压钢筋。

2. 钢筋的冷拔

冷拔是在拔丝机上用强力将直径 6~8mm 的 HPB300 热轧钢筋用强力拔过硬质合金钢模上的比钢筋直径稍小的锥形拔丝孔，迫使钢筋截面缩小、长度增大。这时，钢筋同时受到纵向拉力和侧向压力的作用，内部结构发生变化，从而使其强度明显提高。钢筋一般需要经过多次冷拔，逐级减小直径、提高强度，但在逐级冷拔过程中钢筋的塑性也将逐次下降，而且应力-应变曲线也从有明显屈服点型过渡到没有明显屈服点型。图 1-5 为直径 6mm 的 HPB300 钢筋经过三次冷拔，拔至直径为 3mm 的过程中，冷拔低碳钢丝 $\Phi 3$ 、 $\Phi 4$ 和 $\Phi 5$ 的应力-应变曲线的变化。

四、钢筋应力-应变曲线的数学模型

在钢筋混凝土结构的设计和理论分析中，为简化考虑，常把钢筋的应力-应变曲线理想化，对不同性能的钢筋建立不同的应力-应变曲线数学模型。常用的有以下几种：

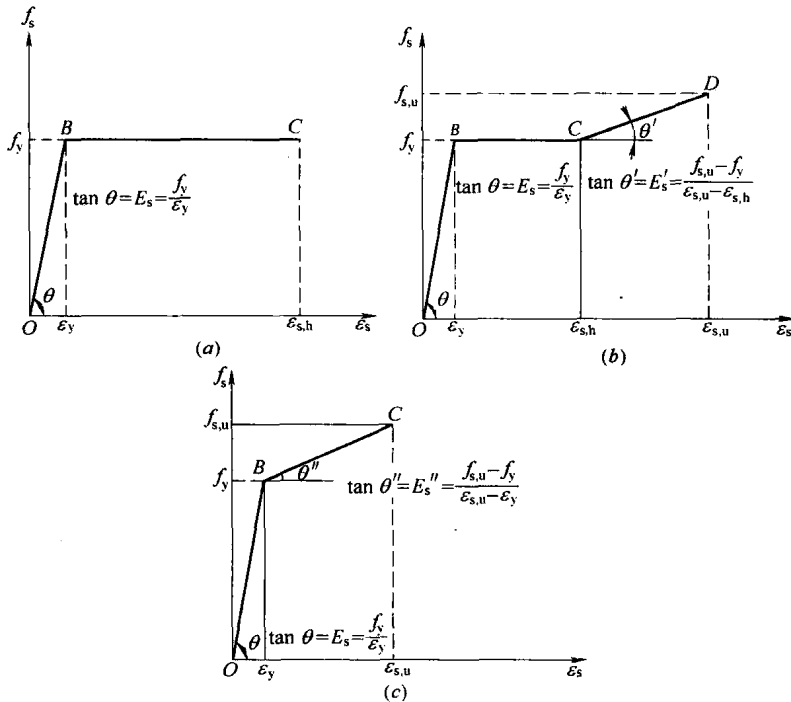


图 1-6 钢筋应力-应变曲线的数学模型

(a) 双直线；(b) 三直线；(c) 双斜线

1. 描述完全弹塑性的双直线模型

双直线模型适用于流幅较长的低强度钢材。模型将钢筋的应力-应变曲线简化为图 1-6 (a) 所示的两段直线，不计屈服强度的上限和由于应变硬化而增加的应力。图中，OB 段

为完全弹性阶段， B 点为屈服下限，相应的应力及应变为 f_y 和 ϵ_y ， OB 段的斜率即为弹性模量 E_s 。 BC 为完全塑性阶段， C 点为应力强化的起点，对应的应变为 $\epsilon_{s,h}$ ，过 C 点后，即认为钢筋变形过大不能正常使用，双直线模型的数学表达式如下：

$$\text{当 } \epsilon_s \leq \epsilon_y \text{ 时,} \quad \sigma_s = E_s \epsilon_s \quad (1-1)$$

$$\text{当 } \epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s,h} \text{ 时,} \quad \sigma_s = f_y \quad (1-2)$$

2. 描述完全弹塑性加硬化的三折线模型

三折线模型适用于流幅较短的软钢，可以描述屈服后立即发生应变硬化（应力强化）的钢材，正确地估计高出屈服应变后的应力。如图 1-6 (b) 所示，图中 OB 及 BC 直线段分别为完全弹性阶段和塑性阶段。 C 点为硬化起点， CD 为硬化阶段。到达 D 点时即认为钢筋破坏，受拉应力达到极限值 $f_{s,u}$ ，相应的应变为 $\epsilon_{s,u}$ 。三折线模型的数学表达形式如下：

当 $\epsilon_s \leq \epsilon_y$ 时， $\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s,h}$ 时，表达式同式 (1-1) 和式 (1-2)；

$$\text{当 } \epsilon_{s,h} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s,u} \text{ 时} \quad , \quad f_s = f_y + (\epsilon_s - \epsilon_{s,h}) \tan \theta' \quad (1-3)$$

式中

$$\tan \theta' = E'_s = 0.01 E_s \quad (1-4)$$

3. 描述弹塑性的双斜线模型

双斜线模型可以描述没有明显流幅的高强钢筋或钢丝的应力-应变曲线。如图 1-6 (c) 所示， B 点为条件屈服点， C 点的应力达到极限值 $f_{s,u}$ ，相应的应变为 $\epsilon_{s,u}$ ，双斜线模型数学表达式如下：

$$\text{当 } \epsilon_s \leq \epsilon_y \text{ 时,} \quad \sigma_s = E_s \epsilon_s \quad (1-5)$$

$$\text{当 } \epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{s,h} \text{ 时,} \quad \sigma_s = f_y + (\epsilon_s - \epsilon_y) \tan \theta' \quad (1-6)$$

式中

$$\tan \theta' = E'_s = \frac{f_{s,u} - f_y}{\epsilon_{s,u} - \epsilon_y} \quad (1-7)$$

五、混凝土结构对钢筋性能的要求

1. 钢筋的强度

所谓钢筋强度是指钢筋的屈服强度及极限强度。钢筋的屈服强度是设计计算时的主要依据（对无明显流幅的钢筋，取其条件屈服强度）。采用高强度钢筋可以节约钢材，取得较好的经济效益。提高钢筋的强度除改变钢材的化学成分生产新的钢种外，还可以对钢筋进行冷加工，以提高其屈服强度；同时，还应考虑钢筋要有适宜的强屈比（极限强度与屈服强度的比值），以保证结构有一定的可靠性潜力。

2. 钢筋的塑性

要求钢材有一定的塑性是为了使钢筋在断裂前有足够的变形，在钢筋混凝土结构中，能给出构件将要破坏的预告信号。同时，要保证钢筋冷弯的要求，通过试验检验钢材承受弯曲变形的能力以间接反映钢筋的塑性性能，钢筋的伸长率和冷弯性能是施工单位验收钢筋是否合格的主要指标。

3. 钢筋的可焊性

可焊性是评定钢筋焊接后接头性能的指标。可焊性好，即要求在一定的工艺条件下，钢筋焊接后不产生裂纹及过大的变形。

4. 钢筋的耐火性

热轧钢筋的耐火性能最好，冷轧钢筋其次，预应力钢筋最差。结构设计时，应注意混