

 普通高等教育土建类专业规划教材

混凝土结构设计原理

Hunningtu Jiegou Sheji Yuanli

杨霞林 林丽霞 / 主编
张元海 / 主审



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

014059398

TU370. 4-43
48

要 览 卷 内

普通高等教育土建类专业规划教材

Hunningtu Jiegou Sheji Yuanli
混凝土结构设计原理

杨霞林 林丽霞 主编
张元海 主审



TU370.4-43
48



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.



北航

C1745796

883820110

内 容 提 要

本书是根据全国高等院校桥梁工程、道路工程和交通土建等专业结构设计原理课程的培养目标和培养方案及教学大纲的基本要求,为满足桥梁工程、道路工程和交通土建等专业的教学需要而编写。全书依据中华人民共和国国家标准和现行桥梁设计规范编写,对公路行业和铁路行业的钢筋混凝土及预应力混凝土结构构件的设计计算原理作了详尽的介绍。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。

本书为高等院校桥梁工程、道路工程和交通土建等专业混凝土结构设计原理课程的教学用书,也可供公路和铁路部门从事桥梁设计、工程研究、施工和管理的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构设计原理 / 杨霞林, 林丽霞主编. —北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014. 8
ISBN 978-7-114-11514-1

I. ①混… II. ①杨… ②林… 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(2014)第 146907 号

普通高等教育土建类专业规划教材

书 名: 混凝土结构设计原理

著 作 者: 杨霞林 林丽霞

责任编辑: 温鹏飞

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 22.75

字 数: 525 千

版 次: 2014 年 8 月 第 1 版

印 次: 2014 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-11514-1

定 价: 48.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

前 言

Foreword

本书是根据全国高等院校道路、桥梁和交通土建专业教学指导委员会审定通过的教学大纲,结合编写团队多年教学经验,为满足桥梁工程、道路工程和交通土建专业混凝土结构设计原理课程的教学需要而编写。

本书编写的主要依据为国家标准《工程结构可靠度设计统一标准》(GB 50153—2008)、公路行业现行规范《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)、《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)及铁路行业现行规范《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)。

本书在编写中适当反映国内较为成熟的新的科研成果,文字叙述力求简练并便于教学。全书共十二章,第一章至第十章依据公路行业现行规范编写,第十一章和第十二章依据铁路行业现行规范编写。

本书编写人员及分工为:绪论、第一、十、十一、十二章及附表2由杨霞林编写;第三、四、五章及附表1由林丽霞编写;第二、六、七、八、九章由张戎令编写。全书由杨霞林、林丽霞统稿主编,张元海教授主审。

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,特此向相关编者表示衷心的感谢。兰州交通大学赵建昌教授和丁小军教授提供了宝贵的意见和帮助,兰州交通大学青年科技基金(2012028)对教材编写给与了支持,在此一并致谢。

由于编者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免有错误和疏漏之处,恳请读者批评指正。

编 者

2014年4月

目录 Contents

绪论	1
第一节 混凝土结构的一般概念	1
第二节 钢筋混凝土结构的主要优缺点	2
第三节 混凝土结构的应用及发展简况	3
第四节 学习本课程需要注意的几个问题	4
思考题	5
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 钢筋与混凝土之间的黏结	23
小结	26
思考题	27
第二章 钢筋混凝土结构设计计算原则	28
第一节 概述	28
第二节 概率极限状态设计法的基本概念	29
第三节 极限状态设计表达式	35
小结	40
思考题	41
习题	41
第三章 受弯构件正截面承载力计算	42
第一节 概述	42
第二节 截面形式及构造	44
第三节 受弯构件正截面的受力性能	47
第四节 受弯构件正截面承载力计算的基本原则	50
第五节 单筋矩形截面受弯构件	53
第六节 双筋矩形截面受弯构件	61
第七节 T形截面受弯构件	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
第一节 概述	83
第二节 影响斜截面抗剪能力的主要因素	84
第三节 斜截面受力特点和受剪破坏形态	87
第四节 斜截面抗剪承载力计算	89
第五节 斜截面抗弯承载力计算	95
第六节 全梁承载能力校核与构造要求	95
第七节 装配式钢筋混凝土简支梁设计	99
小结	107
思考题	108
习题	108
第五章 受压构件	110
第一节 受压构件的分类及一般构造要求	110
第二节 轴心受压构件	113
第三节 偏心受压构件的受力特点与破坏特征	121
第四节 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算	125
第五节 I 形截面偏心受压构件正截面承载力计算	139
第六节 圆形截面偏心受压构件正截面承载力计算	146
小结	150
思考题	151
习题	151
第六章 受拉构件	153
第一节 概述	153
第二节 轴心受拉构件	153
第三节 偏心受拉构件	154
小结	159
思考题	159
习题	159
第七章 受扭构件	160
第一节 纯扭构件	160
第二节 弯剪扭共同作用下矩形截面构件的承载力计算	165
第三节 T 形和 I 形截面受扭构件	168
第四节 箱形截面受扭构件	170
第五节 构造要求	170
小结	173
思考题	174
习题	174

第八章 受弯构件的应力计算及裂缝宽度和变形验算	175
第一节 概述	175
第二节 换算截面	176
第三节 应力计算	179
第四节 裂缝宽度验算	181
第五节 变形验算	185
第六节 混凝土结构的耐久性	191
小结	195
思考题	196
习题	196
第九章 深受弯构件	197
第一节 深受弯构件的破坏形态	197
第二节 深受弯构件的计算	199
小结	202
思考题	203
第十章 预应力混凝土结构	204
第一节 概述	204
第二节 预加应力的方法与设备	209
第三节 预应力混凝土结构的材料	216
第四节 张拉控制应力与预应力损失	218
第五节 预应力混凝土受弯构件的应力计算	229
第六节 预应力混凝土受弯构件的承载力计算	236
第七节 预应力混凝土受弯构件的抗裂验算	241
第八节 变形验算	243
第九节 端部锚固区计算	245
第十节 预应力混凝土简支梁设计	249
第十一节 预应力混凝土简支梁计算示例	258
第十二节 无黏结预应力混凝土构件的简介	282
第十三节 部分预应力混凝土构件的简介	284
小结	286
思考题	287
习题	287
第十一章 铁路桥涵钢筋混凝土结构	289
第一节 概述	289
第二节 受弯构件抗弯强度	289
第三节 受弯构件抗剪强度	301
第四节 偏心受压构件	307

第五节 轴心受压构件·····	314
第六节 裂缝宽度和变形检算·····	316
小结·····	318
思考题·····	319
习题·····	320
第十二章 铁路桥涵预应力混凝土结构·····	322
第一节 概述·····	322
第二节 预应力损失的估算·····	323
第三节 预应力混凝土受弯构件的应力计算·····	325
第四节 预应力混凝土受弯构件的强度计算·····	330
第五节 预应力混凝土受弯构件的抗裂检算·····	334
第六节 裂缝宽度和变形检算·····	335
第七节 端部锚固区计算·····	337
小结·····	339
思考题·····	340
附录 1 《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)附表·····	341
附录 2 《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)附表·····	350
参考文献·····	354



绪 论

第一节 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,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,梁瞬即脆断而破坏,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。使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强,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,梁才被破坏,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力和变形能力可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。

与混凝土梁相比,钢筋混凝土梁的承载能力提高很多,但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。

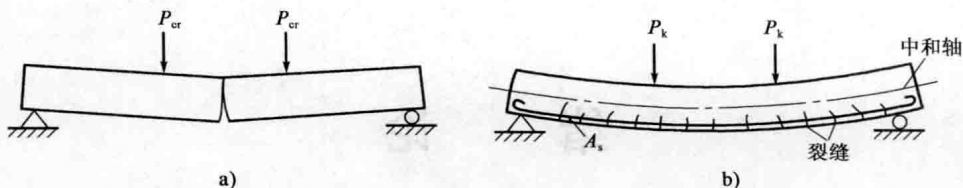


图 0-1 简支梁受力破坏示意图

a) 素混凝土梁; b) 钢筋混凝土梁

钢筋和混凝土这两种性能不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黏结力,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 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$,混凝土约为 $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C} \sim 1.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$),当温度变化时,在钢筋混凝土构件内产生的非协调温度应力较小,因而不致破坏钢筋和相邻混凝土间的黏结力。

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

第二节 钢筋混凝土结构的主要优缺点

一、钢筋混凝土结构的优点

钢筋混凝土结构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较大,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,在火灾中将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,钢筋混凝土结构的耐火

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

钢筋混凝土结构,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,并可根据设计控制其延性,所以对位于地震区的建筑物,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格的各种建筑物。

(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,这对于大跨结构、高层结构以及抗震结构都是不利的。采用轻质高强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,但抗裂荷载提高很小,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结构,以提高其抗裂性。

(3)费工

钢筋混凝土结构施工需要支模、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。

第三节 混凝土结构的应用及发展简况

钢筋混凝土结构出现至今已有 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结构成功应用以来,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结构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,有防射线、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。

在桥涵工程、道路工程中,钢筋混凝土结构主要用于中小跨径桥梁、涵洞、挡土墙以及形状复杂的中、小型构件等。预应力混凝土结构由于采用了高强度材料和预应力工艺,特别适合用于大跨径桥梁和有防渗透要求的结构。以下就材料、结构与施工及设计理论三个方面来简要说明混凝土结构的发展现状和趋势。

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,这对发展大跨结构、高层建筑、高耸结构有重要意义。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,目前研究较多的有钢纤维、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、较好延性和良好的黏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。

结构与施工方面:桥涵结构中部分采用定型化、标准化的钢筋混凝土和预应力混凝土构件,促进了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。另一个发展动向是向大跨和高空发展。

设计理论方面:目前在桥涵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,在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、延性贯穿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和试验研究中,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。

第四节 学习本课程需要注意的几个问题

(1)本课程着重论述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,要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,反映了我国多年来钢筋混凝土和预应力混凝土结构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它、熟悉它和应用它。

(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 学习混凝土结构设计原理课程需注意哪些问题?

第一章 钢筋和混凝土的力学性能

第一节 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。

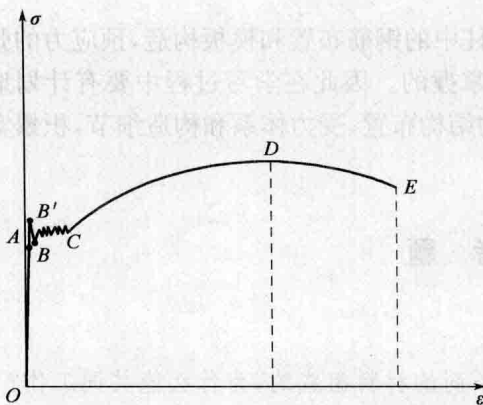


图 1-1 有明显流幅钢筋的应力—应变曲线

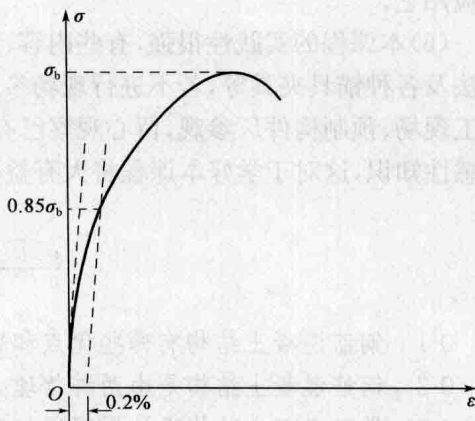


图 1-2 无明显流幅钢筋的应力—应变曲线

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”。有明显流幅钢筋的屈服强度是按屈服下限确定的。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。

钢筋的受压性能试验表明，在达到比例极限之前，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。工程中取钢筋的屈服强度作为钢筋强度取值的依据,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极限以后,将产生很大的塑性变形,而且在卸荷后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,以致无法使用。

对于没有明显流幅或屈服点的预应力钢筋,其应力—应变曲线到顶点极限强度后稍有下降,钢筋出现少量颈缩后立即被拉断,极限延伸率较小。《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)(以下简称《公路桥规》)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。

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,弯转角越大,则说明钢筋的塑性越好。

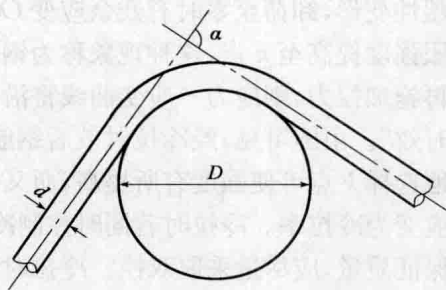


图 1-3 钢筋的弯转

二、钢筋的种类和级别

混凝土结构中使用的钢材,按其化学成分可分为碳素钢及普通低合金钢,按其生产工艺和力学性能的不同可以分为热轧钢筋、冷加工钢筋、预应力钢筋和精轧螺纹钢。

《公路桥规》规定,公路混凝土桥涵的钢筋应按下列规定采用:钢筋混凝土及预应力混凝土构件中的普通钢筋宜选用热轧 R235、HRB335、HRB400 及 KL400 钢筋,预应力混凝土构件中的箍筋应选用其中的带肋钢筋,按构造要求配置的钢筋网可采用冷轧带肋钢筋;预应力混凝土构件中的预应力钢筋应选用钢绞线、钢丝,中、小型构件或竖、横向预应力钢筋也可选用精轧螺纹钢。

热轧钢筋由低碳钢、普通低合金钢或细晶粒钢在高温状态下轧制而成。热轧钢筋按其外形特征可分为光面钢筋和变形钢筋,光面钢筋黏结强度较低,变形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黏结强度。

热轧钢筋按照其强度的高低,分为 R235(Ⅰ级),HRB335(Ⅱ级),HRB400 和 KL400(Ⅲ级)三个级别。R235,HRB335,HRB400 和 KL400 是各钢筋的强度等级代号,其中 HRB335、HRB400 也代表钢筋的牌号。各钢筋尾部的数字为强度等级,亦即钢筋的屈服强度标准值,单位为 MPa。R235 为碳素热轧光圆钢筋,HRB335 和 HRB400 为普通低合金热轧变形钢筋,KL400 为余热处理变形钢筋。

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。

《公路桥规》采用的预应力钢丝按其外形分为光面钢丝、螺旋肋钢丝和刻痕钢丝三种。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。螺旋肋钢丝和

刻痕钢丝与混凝土之间的黏结性能好,适用于先张法预应力混凝土结构。精轧螺纹钢是在整根钢筋上轧有外螺纹的大直径、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 OO_1 。如立即重新加荷,应力—应变曲线将沿 O_1kc 行进,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 $O_1k'd'$ 行进,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。合理地选择 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 I 级钢筋在常温时需 20d,在 100°C 时仅需 2h 即可完成。但若加温至 450°C 时,强度反而有所降低而塑性性能却有所增加。当加温至 700°C 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,所以冷拉钢筋不宜用作受压钢筋。

2. 钢筋的冷拔

冷拔是在拔丝机上将直径 $6\sim 8\text{mm}$ 的 I 级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,从而使其抗拉及抗压强度明显提高。钢筋一般需要经过多次冷拔,逐级减小直径并提高强度,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 I 级钢筋经过三次冷拔,拔至直径为 3mm 的过程中,冷拔低碳钢丝 ϕ^b3 、 ϕ^b4 和 ϕ^b5 的应力—应变曲线的变化。

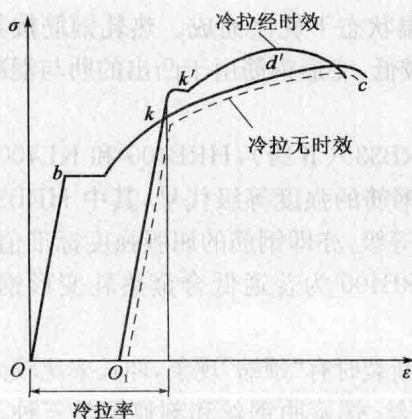


图 1-4 钢筋冷拉后的应力—应变曲线

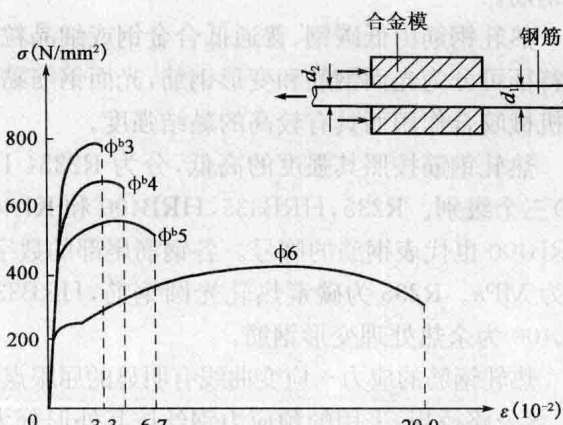


图 1-5 冷拔低碳钢丝的应力—应变曲线

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,为了简化起见,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:

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 1-6a)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:

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

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

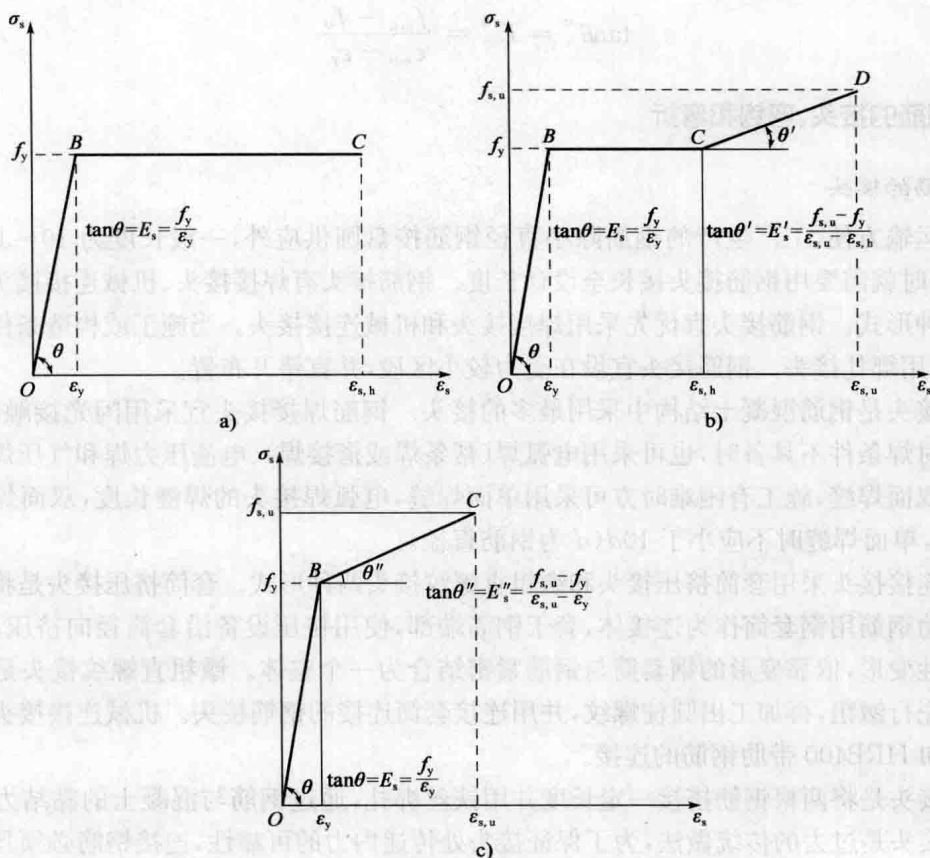


图 1-6 钢筋应力—应变曲线的数学模型

a) 双直线; b) 三折线; c) 双斜线

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