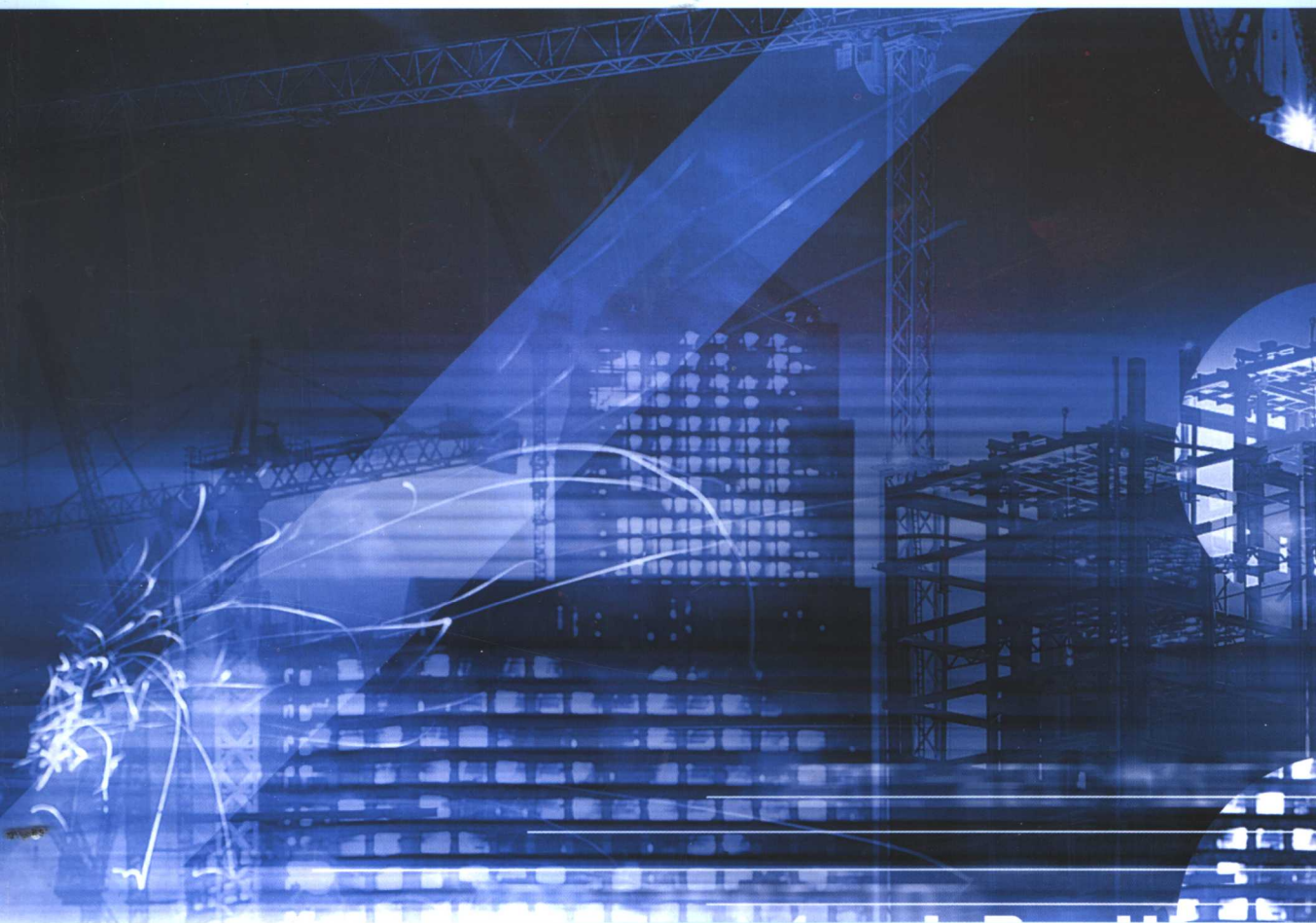


高等学校理工科规划教材

混凝土结构

HUNNINGTU JIEGOU

赵成文 主编



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

高等学校理工科规划教材

混凝土结构

主编 赵成文

编著 赵成文 陈兆才 梁德志

大连理工大学出版社

© 赵成文 2005

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构 / 赵成文主编. —大连:大连理工大学出版社, 2005. 8
ISBN 7-5611-2979-3

I. 混… II. 赵… III. 混凝土 IV. TU528. 571

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 012768 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市凌水河 邮政编码:116024

电话:0411-84708842 传真:0411-84701466 邮购:0411-84707961

E-mail:dutp@dutp.cn URL:<http://www.dutp.cn>

大连业发印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm 印张:16 字数:376 千字

印数:1~3 000

2005 年 8 月第 1 版

2005 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑:刘新彦 范业婷

责任校对:欣 莹

封面设计:宋 蕾

定 价:28.00 元

前 言

本教材是根据全国高校土木工程学科专业指导委员会审定通过的教学大纲,按照现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB50068—2001)、《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)、《建筑结构荷载规范》(GB50009—2001)、《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002)、《砌体结构设计规范》(GB50003—2001)及有关规范,并结合作者多年的教学实践编写而成。

全书分为上、下两册。上册为混凝土结构设计原理,主要介绍钢筋混凝土和预应力混凝土基本构件的受力性能、计算原理和设计方法;下册为混凝土结构与砌体结构,主要介绍钢筋混凝土梁板结构、单层厂房结构、多层和高层结构、公路桥梁结构及砌体结构的设计方法。

本书编写时,力求内容充实,重点突出,语言通俗易懂,以利于教学和自学。各主要章节均有一定数量的例题,每章都附有思考题和习题。本书可作为大专院校土木工程专业的教材,也可供从事土木工程的技术人员学习参考。

参加上册编写的有:沈阳建筑大学赵成文(第1~3、8、9章),沈阳建筑大学陈兆才(第4、5、7章),沈阳建筑大学梁德志(第6、10、11章)。上册全书由赵成文组织编写、统稿及最终定稿。大连理工大学王吉忠老师审阅了全书,并提出了宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中缺点甚至错误在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2005年8月于沈阳

目 录

第1章 绪论 /1

- 1.1 混凝土结构的一般概念 /1
- 1.2 混凝土结构的发展概况 /3
- 1.3 学习本课程应注意的问题 /4

思考题 /5

第2章 钢筋与混凝土材料的物理力学性能 /6

2.1 钢筋 /6

- 2.1.1 钢筋的品种和级别 /6
- 2.1.2 钢筋的强度和变形 /7
- 2.1.3 钢筋的疲劳 /8
- 2.1.4 钢筋的选择 /9

2.2 混凝土 /9

- 2.2.1 单轴应力状态下混凝土的强度 /9
- 2.2.2 复合应力状态下混凝土的强度 /12
- 2.2.3 混凝土的变形 /13

思考题 /21

第3章 结构设计方法 /22

3.1 结构的功能要求和极限状态 /22

- 3.1.1 结构的功能要求 /22
- 3.1.2 结构的极限状态 /22
- 3.1.3 结构的设计状况 /23

3.2 结构上的作用、作用效应和结构抗力 /24

3.3 极限状态方程 /25

- 3.3.1 设计基准期和设计使用年限 /25
- 3.3.2 极限状态方程 /26

3.4 结构近似概率极限状态设计法 /26

- 3.4.1 结构可靠度和失效概率 /26
- 3.4.2 目标可靠指标和安全等级 /27

3.5 实用设计表达式 /28

- 3.5.1 分项系数 /28
- 3.5.2 承载力极限状态设计表达式 /29
- 3.5.3 正常使用极限状态设计表达式 /30
- 3.5.4 按极限状态设计时材料强度指标 /31

3.6 混凝土结构耐久性设计规定 /32

思考题 /34

第4章 受弯构件正截面受弯承载力计算 /36

4.1 一般构造要求 /36

- 4.1.1 截面形式 /36
- 4.1.2 截面尺寸 /36
- 4.1.3 混凝土保护层 /37
- 4.1.4 纵向受力钢筋 /38

4.2 受弯构件正截面试验研究 /39

- 4.2.1 受弯构件正截面的破坏形态 /39
- 4.2.2 适筋梁正截面受力的三个阶段 /40

4.3 受弯构件正截面承载力计算的一般原则 /42

- 4.3.1 正截面承载力计算的基本假定 /42
- 4.3.2 平衡方程 /43
- 4.3.3 等效矩形应力图形 /44
- 4.3.4 界限相对受压区高度与最小配筋率 /44

4.4 单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算 /46

- 4.4.1 基本计算公式 /46
- 4.4.2 计算表格的应用 /47
- 4.4.3 计算方法 /48
- 4.4.4 计算例题与讨论 /49

4.5 双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算 /53

- 4.5.1 概述 /53
- 4.5.2 钢筋的抗压强度设计值 f_y /53
- 4.5.3 计算公式及适用条件 /54
- 4.5.4 计算方法 /56

4.6 单筋T截面受弯构件正截面承载力计算 /59

- 4.6.1 概述 /59

- 4.6.2 基本计算公式 /60
- 4.6.3 计算方法 /63
- 思考题 /65
- 习题 /66
- 第5章 受弯构件斜截面受剪承载力计算 /68**
 - 5.1 概述 /68
 - 5.2 无腹筋梁的受剪性能 /68
 - 5.2.1 斜裂缝的形成 /68
 - 5.2.2 无腹筋梁斜裂缝出现后的受力状态 /70
 - 5.2.3 无腹筋梁的剪切破坏形态 /71
 - 5.3 有腹筋梁的受剪性能 /72
 - 5.3.1 有腹筋梁斜裂缝出现后的受力状态 /72
 - 5.3.2 有腹筋梁的剪切破坏形态 /73
 - 5.4 影响斜截面抗剪强度的主要因素 /73
 - 5.4.1 剪跨比 /73
 - 5.4.2 混凝土强度 /74
 - 5.4.3 纵筋配筋率 /74
 - 5.4.4 配箍率和箍筋强度 /74
 - 5.5 受弯构件斜截面受剪承载力计算 /75
 - 5.5.1 基本假设 /75
 - 5.5.2 无腹筋梁受剪承载力计算公式 /76
 - 5.5.3 有腹筋梁受剪承载力计算公式 /77
 - 思考题 /86
 - 习题 /86
- 第6章 黏结、锚固及钢筋布置 /88**
 - 6.1 黏结 /88
 - 6.1.1 黏结的概念 /88
 - 6.1.2 黏结的机理 /89
 - 6.2 黏结强度 /90
 - 6.3 钢筋的锚固 /92
 - 6.3.1 基本锚固长度 /92
 - 6.3.2 固定边支座 /93
 - 6.3.3 中间支座 /93
 - 6.3.4 简支支座 /94
 - 6.3.5 箍筋的锚固 /95
 - 6.4 钢筋的连接 /95
 - 6.5 受弯构件纵向受拉钢筋的弯起与截断 /97
 - 6.5.1 抵抗弯矩图 /98
 - 6.5.2 纵筋的弯起 /100
 - 6.5.3 纵向受拉钢筋的截断 /102
- 6.6 钢筋细部尺寸 /103
- 6.7 设计例题 /103
- 思考题 /106
- 第7章 受扭构件承载力计算 /107**
 - 7.1 概述 /107
 - 7.2 纯扭构件的承载力计算 /107
 - 7.2.1 纯扭构件的开裂扭矩 /107
 - 7.2.2 纯扭构件的破坏特征 /109
 - 7.2.3 纯扭构件的承载力计算 /109
 - 7.2.4 按《混凝土结构设计规范》的配筋计算方法 /111
 - 7.3 弯剪扭截面剪扭构件的承载力计算 /113
 - 7.3.1 矩形截面剪扭构件的承载力计算 /113
 - 7.3.2 矩形截面弯剪扭构件的承载力计算 /114
 - 7.3.3 T形截面和I形截面弯剪扭构件的承载力计算 /114
 - 7.4 构造要求 /115
 - 思考题 /118
 - 习题 /119
- 第8章 受压构件正截面承载力 /120**
 - 8.1 概述 /120
 - 8.2 受压构件的构造要求 /120
 - 8.2.1 截面形式及尺寸 /120
 - 8.2.2 材料强度 /121
 - 8.2.3 纵向钢筋 /121
 - 8.2.4 箍筋 /121
 - 8.3 轴心受压构件正截面承载力 /122
 - 8.3.1 普通箍筋轴心受压柱正截面承载力 /123
 - 8.3.2 螺旋箍筋轴心受压柱正截面承载力 /128
 - 8.4 偏心受压构件正截面受力性能 /131
 - 8.4.1 试验研究及构件破坏形态 /131
 - 8.4.2 偏心受压构件的二阶效应 /133
 - 8.4.3 长细比对偏心受压构件承载力的影响 /133
 - 8.4.4 附加偏心距和偏心距增大系数 /134
 - 8.4.5 柱的计算长度 /136
 - 8.5 偏心受压构件正截面承载力 /137
 - 8.5.1 基本假定和两种受压破坏形态的界限 /137

- 8.5.2 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算公式 /138
- 8.5.3 非对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算方法 /141
- 8.5.4 对称配筋矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算方法 /149
- 8.5.5 I形截面偏心受压构件正截面承载力计算公式 /152
- 8.5.6 对称配筋I形截面偏心受压构件正截面承载力计算方法 /154
- 8.5.7 N_e-M_e 相关曲线 /156
- 8.6 双向偏心受压构件正截面承载力 /157
 - 8.6.1 基本公式 /157
 - 8.6.2 《规范》简化计算公式 /159
- 8.7 偏心受压构件斜截面受剪承载力 /160
 - 8.7.1 轴向压力对构件斜截面受剪承载力的影响 /160
 - 8.7.2 偏心受压构件斜截面受剪承载力计算公式 /160
- 思考题 /160
- 习题 /161
- 第9章 受拉构件的截面承载力 /163
 - 9.1 轴心受拉构件正截面承载力 /163
 - 9.2 偏心受拉构件正截面承载力 /163
 - 9.2.1 大偏心受拉构件正截面承载力 /163
 - 9.2.2 小偏心受拉构件正截面承载力 /164
 - 9.3 轴心受拉构件斜截面受剪承载力 /166
- 思考题 /166
- 习题 /167
- 第10章 钢筋混凝土构件的裂缝及变形控制 /168
 - 10.1 概述 /168
 - 10.1.1 正常使用极限状态 /168
 - 10.1.2 裂缝的控制等级 /168
 - 10.1.3 变形控制的目的和要求 /169
 - 10.2 裂缝的成因及对策 /170
 - 10.2.1 直接由荷载作用引起的裂缝 /171
 - 10.2.2 非荷载因素引起的裂缝 /171
 - 10.3 裂缝宽度计算理论概述 /174
 - 10.3.1 黏结滑移理论 /174
 - 10.3.2 无滑移理论 /175
 - 10.3.3 两种理论的综合 /176
 - 10.4 《规范》裂缝宽度的计算公式 /176
 - 10.5 影响裂缝宽度的因素分析及例题 /179
 - 10.6 变形验算 /181
 - 10.6.1 钢筋混凝土截面抗弯刚度的主要特点 /181
 - 10.6.2 荷载标准效应组合下受弯构件的短期刚度 /182
 - 10.6.3 考虑部分荷载长期作用影响的截面刚度 /184
 - 10.6.4 受弯构件的挠度计算 /186
 - 10.6.5 计算例题 /186
- 思考题 /187
- 习题 /188
- 第11章 预应力混凝土结构构件 /189
 - 11.1 预应力混凝土的概念 /189
 - 11.1.1 概述 /189
 - 11.1.2 预应力混凝土的基本原理 /189
 - 11.1.3 预应力混凝土构件的优缺点 /190
 - 11.2 施加预应力的方法 /191
 - 11.2.1 先张法 /191
 - 11.2.2 后张法 /192
 - 11.3 预应力混凝土的材料、夹具和锚具 /193
 - 11.3.1 混凝土 /193
 - 11.3.2 钢材 /193
 - 11.3.3 夹具和锚具 /194
 - 11.4 张拉控制应力和预应力损失 /196
 - 11.4.1 张拉控制应力 σ_{con} /196
 - 11.4.2 预应力损失 /197
 - 11.4.3 预应力损失的组合 /202
 - 11.5 预应力钢筋的传递长度、锚固长度、局部受压计算 /203
 - 11.5.1 先张法构件预应力钢筋的传递长度和锚固长度 /203
 - 11.5.2 后张法构件端部锚固区的局部受压计算 /204
 - 11.6 预应力混凝土轴心受拉构件的计算 /207
 - 11.6.1 轴心受拉构件各阶段应力分析 /207
 - 11.6.2 轴心受拉构件使用阶段的计算 /215
 - 11.6.3 轴心受拉构件施工阶段的验算 /216
 - 11.7 预应力混凝土受弯构件的计算 /220

- 11.7.1 受弯构件的应力分析 /220
- 11.7.2 矩形截面正截面受弯承载力计算 /224
- 11.7.3 受弯构件斜截面受剪承载力计算 /225
- 11.7.4 受弯构件使用阶段正截面抗裂度验算及裂缝宽度验算 /226
- 11.7.5 受弯构件斜截面抗裂度验算 /227
- 11.7.6 受弯构件的变形验算 /228
- 11.7.7 受弯构件施工阶段的验算 /230
- 11.8 预应力混凝土构件的构造要求 /231
- 11.9 部分预应力混凝土与无黏结预应力混凝土 /234
- 思考题 /237
- 习题 /237
- 附录 /239
- 附表 1 普通钢筋强度标准值 /239
- 附表 2 预应力钢筋强度标准值 /239
- 附表 3 普通钢筋强度设计值 /239
- 附表 4 预应力钢筋强度设计值 /240
- 附表 5 钢筋弹性模量 /240
- 附表 6 普通钢筋疲劳应力幅限值 /240
- 附表 7 预应力钢筋疲劳应力幅限值 /241
- 附表 8 混凝土强度标准值 /241
- 附表 9 混凝土强度设计值 /241
- 附表 10 混凝土弹性模量 /241
- 附表 11 混凝土疲劳强度修正系数 /241
- 附表 12 混凝土疲劳变形模量 /241
- 附表 13 受弯构件的挠度限值 /242
- 附表 14 结构构件的裂缝控制等级及最大裂缝宽度限值 w_{lim} /242
- 附表 15 纵向受力筋的混凝土保护层最小厚度 /243
- 附表 16 钢筋混凝土结构构件中纵向受力钢筋的最小配筋率 /243
- 附表 17 钢筋混凝土矩形和 T 形截面受弯构件正截面抗弯承载力计算系数表 /244
- 附表 18 钢筋的计算截面面积及理论质量 /245
- 附表 19 钢绞线公称直径、公称截面面积及理论质量 /245
- 附表 20 钢丝公称直径、公称截面面积及理论质量 /245
- 附表 21 钢筋混凝土板每米宽的钢筋截面面积 /246

第1章 绪 论

1.1 混凝土结构的一般概念

混凝土是非匀质的、非线性的人工合成材料,其显著特点是抗压强度高,抗拉强度低,质脆易裂。因此,其单独应用范围是很有限的,只有在混凝土中加入适当形式和适当数量的钢材后,才能避其弊用其利。工程中把以混凝土为主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、钢-钢筋混凝土组合结构、纤维混凝土结构和素混凝土结构等,其中钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构在实际工程中应用最为广泛,其设计原理是本教材着重讲述的内容。

钢筋混凝土结构是由钢筋和混凝土两种材性迥异的材料以适当匹配组合而成的,混凝土主要承受压力,钢筋主要承受拉力,两者优势互补,使得混凝土结构的承载力和延性都有所提高。同时,由于钢筋埋入混凝土中,其稳定性差、易腐蚀和不耐火的缺点得以克服。下面通过示例对比说明钢筋和混凝土组合的必然性。

图 1-1(a) 所示为一素混凝土简支梁(混凝土: $f_{tk} = 1.54 \text{ MPa}$),在集中荷载 P 作用下,当梁跨中截面受拉边缘产生的拉应力达到混凝土的抗拉强度时,梁突然脆性断裂为两段,梁的开裂荷载即为其破坏荷载 $P_{c1} = P_{u1} = 6.06 \text{ kN}$,但是,此时梁同截面受压边缘的应力与混凝土抗拉强度接近,由此可见,混凝土抗压强度高的优势未得到发挥,梁的极限承载力取决于混凝土的抗拉强度。

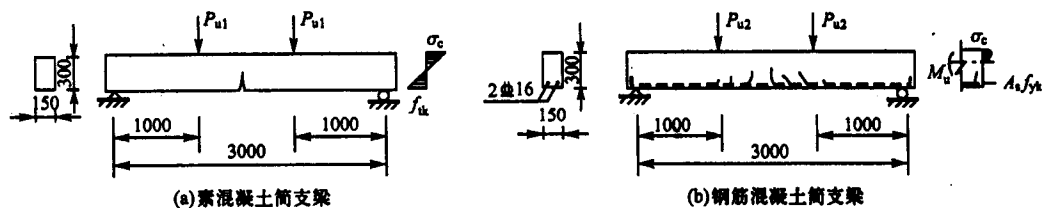


图 1-1 混凝土简支梁极限承载力

图 1-1(b) 所示为另一根与图 1-1(a) 截面尺寸、跨度、混凝土强度等级和加载方式完全相同的钢筋混凝土简支梁,在其受拉区配置适量钢筋 A_s (钢筋: $A_s = 402 \text{ mm}^2$, $f_{yk} = 335 \text{ MPa}$)。在集中荷载 P 作用下,当梁跨中截面受拉边缘产生的拉应力达到混凝土的抗拉强度时,梁的开裂荷载 P_{c2} 略大于 P_{c1} ,混凝土开裂而退出工作,配置在受拉区的钢筋承担几乎全部拉应力。此时,钢筋混凝土梁并不像素混凝土梁那样立即断裂而破坏,可继续加载,直至受拉钢筋的应力达到其屈服强度,此后,裂缝向混凝土受压区延伸,使受压区混凝土达到其抗压强度而被压碎,梁达到极限承载力 $P_{u2} = 31.45 \text{ kN}$ 。由此可见,配置钢筋后,两种材料各自优势得以充分发挥,不仅提高梁的极限承载力,且具有较好的延性。 P_{u2} 与 P_{u1} 比值的大

小取决于配置纵筋数量和屈服强度。但是,当 P 大于 P_{e2} 直至达到 P_{u2} ,梁一直处于带裂缝工作状态,通常裂缝宽度很小,在一般情况下不至于影响梁的正常使用。但是,由于梁截面开裂导致其抗弯刚度显著降低,使得钢筋混凝土梁应用于大跨度结构受到限制。目前解决这一问题可采用施加预应力的方法,这部分内容将在第10章介绍。

钢筋和混凝土两种材性截然不同的材料组合制成的结构构件,它们之所以能够组合在一起并有效地共同工作,其主要原因在于:

(1) 钢筋和混凝土之间存在着良好的黏结力,在荷载作用下,钢筋与其相邻的混凝土变形协调,共同工作;

(2) 钢筋和混凝土两种材料具有相近的温度线膨胀系数(钢筋为 $1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$,混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$),因此,当温度变化时,钢筋和混凝土界面处不至于因产生较大的相对变形而导致两者间的黏结破坏。因此,钢筋和混凝土之间的有效黏结是钢筋混凝土构件受力性能分析的基本条件,同时也是保证钢筋混凝土构件正常工作的前提条件。

目前,应用钢筋混凝土结构的工程领域有:建筑工程、桥梁和交通工程、水利工程、地下工程、特殊结构工程等。钢筋混凝土结构的应用范围如此广泛,除了能合理地利用钢筋和混凝土两种材料的特性外,主要是因为有以下优点:

(1) 易取材、造价低。钢筋混凝土结构中用钢量相对钢结构要少得多,而大量使用砂、石材料,这些材料在多数地区可以就地就近取材,减少材料运输费用,从而降低工程造价。近年来,将具有一定活性的工业废料作为掺合料加入混凝土中替代部分水泥,取得了明显的经济效益和社会效益。

(2) 可模性好。新拌混凝土是可塑的,因此,可根据设计需要浇筑成各种形状和尺寸的结构,特别适宜形状复杂的大体积结构、空间薄壁类及不规则截面的空腔结构。

(3) 耐久性和耐火性较好。钢筋配置于混凝土中,钢筋不易锈蚀,从而使钢筋混凝土结构具有较好的耐久性。混凝土是不良导热体,钢筋混凝土结构在短时间火灾条件下不至于因钢筋的升温软化而导致结构丧失承载能力。

(4) 整体性好。现浇钢筋混凝土结构的整体性好,合理的结构设计,可获得较好的延性,适用于抗震、抗爆结构。另外,混凝土结构具有较好的防辐射性能,适用于防护结构。

(5) 品种多样性。随着混凝土制备技术的不断改进和发展,在混凝土中添加各种外加剂和有一定活性的掺合料,可获得性能不同的混凝土,如高强混凝土、早强混凝土、泵送混凝土、免振混凝土、喷射混凝土等,以便满足不同工程的需求。

但是,钢筋混凝土结构也存在一些缺点:

(1) 自重较大。不适用于大跨和超高层结构。另外,使结构的地震反应增大。

(2) 施工复杂。结构的施工工序多,施工周期长,施工受季节、天气的影响较大,且施工质量较难以控制。

(3) 抗裂性差。普通钢筋混凝土结构的抗裂性较差,正常使用阶段往往是带裂缝工作,尤其在露天和具有腐蚀的环境中,将会影响结构的耐久性。

(4) 隔热隔声性能差。

(5) 修复补强较困难。钢筋混凝土结构一旦局部损坏或承载力不足,其修复和补强较为困难。

尽管钢筋混凝土结构的上述缺点在某种程度上限制了其应用范围,但是,随着钢筋混凝

土结构理论研究的不断深入,这些缺点已经或正在逐步得到克服。例如,采用高强混凝土、轻骨料混凝土或预应力混凝土,可以减轻结构自重;采用装配整体式结构体系可以减少施工现场湿作业、节约模板,加快施工速度。采用预应力混凝土,可以较好地解决构件抗裂性差的问题;采用树脂涂层钢筋,可防止钢筋锈蚀,从而提高结构的耐久性;采用轻质复合材料,可以改善结构隔热隔声差的问题;采用粘贴钢板或碳纤维布加固混凝土结构技术,可以较方便进行结构补强,且该方法基本不增加原结构自重。

1.2 混凝土结构的发展概况

钢筋混凝土结构自19世纪中叶开始应用以来,仅约有150年的历史。与原始人类最早以土、木为主要材料建造房屋,文明史初期出现的砖石砌体结构,以及工业革命后期大量采用的钢结构相比,钢筋混凝土结构是结构工程中最年轻的成员。但是,由于它具有易取材、成本低、结构形式多样性、适用范围广等优势,其发展非常迅速。目前,在世界各国,尤其是在我国,钢筋混凝土结构已成为结构工程中量大面广的结构形式。

正是由于钢筋混凝土结构的应用范围的日趋扩大,建筑市场需求的巨大推动力促进了混凝土制备技术、结构或结构构件受力性能、结构方案、施工工艺、构造措施、理论分析和设计方法等方面的广泛深入研究,所取得的丰富成果在工程中应用收到显著的经济效益和社会效益,反过来又进一步促进了理论研究工作的深入开展。下面简要叙述混凝土结构的发展现状。

(1) 材料

混凝土结构的主要材料近年来已有长足的发展。由于外加剂和有一定活性掺合料掺入到混凝土中,能有效地改善混凝土的工作性能和受力性能,混凝土材料正在向高强、高性能、环保型“绿色混凝土”方向发展。目前,在我国实际工程中,C50~C80级混凝土已屡见不鲜,个别工程混凝土已用到C100级以上。此外,轻骨料混凝土、纤维混凝土在实际工程中应用范围正日趋扩大。

(2) 结构体系

混凝土结构形式具有多样性。在建筑工程领域有框架、框架-剪力墙、剪力墙、框架-核心筒等结构;在桥梁和交通工程领域有梁式、箱形梁式、拱等结构;在水利工程领域有坝、港口和码头、蓄水池等结构;在地下工程领域有基础、隧道、矿井、沉井等结构;在特殊工程领域有电视塔、栈桥、筒仓、烟囱、海洋平台、机场跑道、核电站安全壳等结构。

(3) 设计理论

20世纪初,混凝土结构设计理论尚未建立,设计沿用材料力学容许应力设计法。进入40年代,已开始采用考虑混凝土塑性能量的破损阶段设计法,到了50年代,已过渡到极限状态设计法。目前,世界上大多数国家普遍采用更为科学的以概率理论为基础的极限状态设计法。设计理论未来的发展方向是全概率法和最优失效概率法。结构的内力计算,由最初的简单弹性分析法,逐步发展为考虑结构塑性变形的极限平衡法。近年来,随着计算机和有限元分析法在结构工程中应用技术的日趋完善,为结构受力的全过程分析和复杂结构的准确分析提供了有效手段,在较为复杂的实际工程中日益普及。

(4) 典型工程

目前世界最高的混凝土建筑是马来西亚吉隆坡 City Center 的双塔大厦,88层,高450

m,为钢筋混凝土结构;我国目前最高建筑是上海的金茂大厦,88层,高421 m,其主体为正方形钢筋混凝土框筒结构;上海正建造的95层460 m高的浦东环球金融中心大厦,内筒为钢筋混凝土结构,建成后将成为世界最高建筑物;目前世界上跨度最大的混凝土拱桥是克罗地亚的克尔克Ⅱ号桥,为上承式空腹拱桥,跨度390 m,拱圈厚6.5 m;我国四川万县长江大桥,为上承式钢管混凝土和型钢组成三室箱形截面拱桥,其跨度已达到420 m;上海杨浦斜拉桥,主跨602 m,其桥塔和桥面均为混凝土结构;目前世界上最高的电视塔是加拿大多伦多电视塔,混凝土结构部分高度为549 m;上海东方明珠电视塔是由三个钢筋混凝土筒体组成的主体结构,混凝土结构部分高度为415.2 m;目前世界上最高的重力坝是瑞士狄克桑斯大坝,坝高285 m;我国龙羊峡水电站的拦河重力大坝,坝高178 m,正在兴建的长江三峡水利枢纽工程,坝高186 m,是世界上最大的水利工程。

1.3 学习本课程应注意的问题

混凝土结构作为结构工程学科的一个分支,其发展也遵循工程学科发展的一般规律,即实践—认识—再实践—再认识。因此,本课程与基础理论课相比,其本身具有内在的特殊性,在学习过程中应随时调整学习方法,同时,要注意以下几点:

(1) 混凝土结构是由钢筋和混凝土两种材料组合而成的,其受力性能因混凝土材料的非匀质、非弹性、且力学性能指标离散性大变得复杂,“材料力学”的许多计算公式不能直接应用。但是,“材料力学”的基本分析方法,即材料的物理条件、变形的几何条件和受力的平衡条件同样适用于混凝土结构构件的受力分析,但在学习中应注意它们之间的差别。

(2) 本课程旨在解决安全适用和经济合理这对矛盾,因此,钢筋和混凝土两种材料的合理匹配和匹配界限是重点研究内容之一。两种材料匹配超过某种限制条件,将导致结构构件的受力性能发生质的变化,这一点在学习中应予以高度重视。

(3) 由于混凝土结构受力性能的复杂性和影响因素的多样性,目前尚无较完善的理论分析方法,试验研究是使混凝土结构复杂问题简单化的主要手段。因此,在学习中应重视试验研究方法,重点了解试验所揭示混凝土结构受力机理和一般规律,掌握计算公式及相应的适用条件,切忌死记硬背。

(4) 构造措施是长期试验研究和工程实践的总结,是对计算设计必不可少的补充。因此,在学习过程中,应将构造设计与计算设计同等重视。同时,必须弄懂构造措施的基本原理。

(5) 混凝土结构设计是解决安全适用和经济合理这对矛盾的综合性问题。对同一问题,往往有不同的解决方法,同一问题的设计结果不是惟一的,这就要综合考虑使用功能、材料供应、施工条件和经济效益等各种因素,从中选出较优的设计方案。因此,在学习中要注意培养对多种因素进行综合分析的能力。

(6) 在学习本课程过程中,要学会运用有关的规范或规程。规范或规程是国家技术政策在工程实践中的具体体现,是参与者必须遵守的法律文件。但是,本学科是不断发展的学科,在工程实践中应发挥参与者的创造性,不应受规范或规程束缚,在具有可靠理论和试验研究的前提条件下,应积极采用先进的理论和技术。

(7) 本课程是一门实践性很强的课程,在学习中应重视教学实践环节。通过教学实践了

解实际工程的结构布置、局部构造和施工技术,积累感性认识,增加工程经验,这对于学好本课程将大有益处。

思考题

- 1-1 为什么在混凝土梁中要配适量的钢筋?
- 1-2 钢筋和混凝土组合在一起能有效共同工作的前提条件是什么?
- 1-3 钢筋混凝土结构有哪些优点和缺点?
- 1-4 学习本课程应注意哪些问题?

第 2 章 钢筋与混凝土材料的物理力学性能

钢筋混凝土结构构件的承载能力,主要取决于钢筋和混凝土材料的强度、变形性能及两种材料的合理匹配。因此,了解两种材料的物理力学性能是掌握钢筋混凝土构件受力性能、计算理论和设计方法的基础。

2.1 钢筋

2.1.1 钢筋的品种和级别

目前我国在钢筋混凝土结构中所采用的钢筋品种很多,主要分为两大类:一类是有物理屈服点的钢筋,如热轧钢筋,分别为 HPB235 级光面钢筋,HRB335、HRB400 和 RRB400 级变形钢筋。另一类是无明显物理屈服点的钢筋,如钢绞线(有三股和七股两种)、消除应力钢丝(有光面、刻痕和螺旋肋三种)及热处理钢筋(见图 2-1)。我国常用钢筋的化学成分、标注符号、直径和强度指标见附表 1 和附表 2。

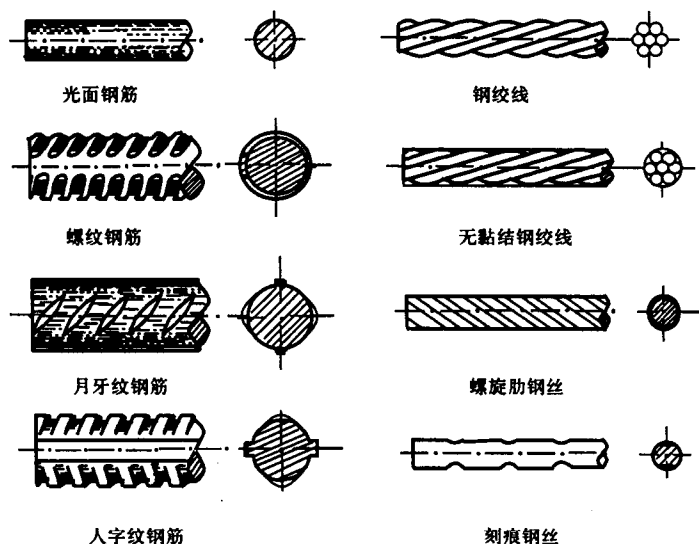


图 2-1 常用钢筋类型

在实际工程中,HPB235 级钢筋多用于现浇楼板、小型构件的受力筋和箍筋;HRB335、HRB400 和 RRB400 级钢筋多用于钢筋混凝土构件的受力筋,有些构件也有用 HRB335 级钢筋作箍筋的。在条件允许的情况下,钢筋混凝土结构中的受力钢筋宜优先选用 RRB400 级钢筋。

热轧钢筋通过冷加工的方法可以提高其强度,达到节约钢材的目的。但钢筋经冷加工后其延伸率有所降低,易脆性断裂,因此,对承受冲击荷载或重复荷载及处于低温下的混凝土结构,一般不宜采用冷拉钢筋。冷加工的方法不同,钢筋强度的提高也不尽相同,冷拉只能提高钢筋的抗拉强度,冷拔则可同时提高抗拉及抗压强度。由于近年来我国高强钢筋品种逐年增多,足以满足建筑市场的需求,因此《混凝土结构设计规范》(GB50010—2002)(以下简称《规范》)未将冷加工钢筋的强度指标纳入,应用时可参照相关的行业标准执行。

热处理钢筋是将特定强度的热轧钢筋经过加热、淬火和回火等调质工艺处理的钢筋,又称“调质钢筋”。热处理后钢筋强度得到较大幅度的提高,而塑性降低并不多。热处理钢筋多用于预应力混凝土结构。

2.1.2 钢筋的强度和变形

钢筋的强度和变形性能可以用单调拉伸试验得到的应力-应变曲线来说明。混凝土结构所用的钢筋因应力-应变曲线性质的不同可分为两类:有明显屈服点钢筋(如热轧钢筋)和无明显屈服点钢筋(如高强钢丝)。

1. 有明显屈服点钢筋

有明显屈服点钢筋单调拉伸试验得到的典型应力-应变曲线见图2-2。 a 点以前应力 σ_s 与应变 ϵ_s 成正比例关系, a 点称为比例极限;过 a 点直至 a' 点,应力 σ_s 与应变 ϵ_s 虽不再成正比例关系,但在曲线 aa' 段上任意一点处卸荷,应变 ϵ_s 可沿原应力-应变曲线关系回到坐标原点, a' 点称为弹性极限;过 a' 点上升至 b 点后下降到 c 点,这个阶段应变出现塑性流动现象, b 点称为屈服上限,其值与加载速度、截面形式、试件表面光洁度等因素有关,因此 b 点是不稳定的, c 点称为屈服下限,

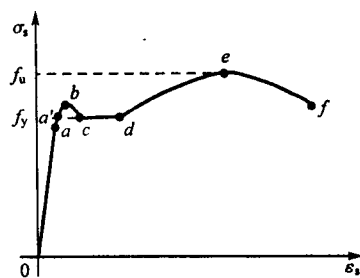


图2-2 有明显屈服点钢筋的应力-应变曲线

与屈服下限相对应的钢筋应力称为屈服强度;过 c 点后至 d 点,应力基本保持不变的情况下应变不断增长,钢筋产生相当大的塑性变形, cd 段称为屈服台阶或流幅;过 d 点后应力再次随应变的增加而增加,至 e 点应力达到最大值, e 点应力称为抗拉强度或极限强度, de 段称为强化阶段;过 e 点后,试件某薄弱位置截面面积迅速减小而产生颈缩现象,应变随应力的降低而继续增长,直至 f 点试件被拉断为止, ef 段称为下降段。图中 ef 段曲线没有考虑试件产生颈缩的影响。

在钢筋混凝土构件计算中,取钢筋的屈服强度作为设计依据。这是因为结构构件某一截面钢筋屈服后,使构件在外荷载基本保持不变的情况下产生很大的塑性变形和不可闭合的裂缝。此时构件可能在钢筋尚未进入强化阶段之前就已失去使用功能的要求甚至导致构件破坏,故取钢筋的屈服强度作为构件极限承载力计算指标。此外,钢筋的极限强度与屈服强度之比值称为强屈比,这个指标反映了钢筋强度储备的大小。

2. 无明显屈服点钢筋

无明显屈服点钢筋单调拉伸试验得到的典型应力-应变曲线见图2-3。由图可见这类钢筋没有明显的屈服点和屈服台阶,其强度很高,但塑性较差,破坏时呈脆性。对该类钢筋,设计中一般取残余应变为0.2%时所对应的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为强度设计指标, $\sigma_{0.2}$ 称为条件屈服强

度。由于条件屈服点不易测定,因此《规范》取极限抗拉强度(σ_b)乘 0.85 作为条件屈服强度。

3. 弹性模量

当钢筋的应力在比例极限范围内时,其受拉弹性模量显然是

$$E_s = \frac{\sigma}{\epsilon} = \text{常数} \quad (2-1)$$

试验表明,对于有明显屈服点的钢筋,其受压应力-应变曲线与受拉应力-应变曲线在屈服阶段以前基本重合,故其比例极限强度、屈服强度和弹性模量与受拉的完全相同。各种钢筋的弹性模量 E_s 的取值见附表 5。

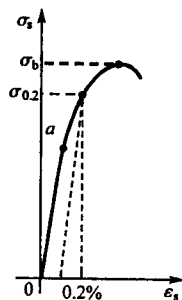


图 2-3 无明显屈服点钢筋的应力-应变曲线

4. 延伸率

钢筋的延伸率是标距范围钢筋试件拉断后的残余变形与原标距之比,用 δ 表示。即

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (2-2)$$

式中, l_0 ——试件拉伸前的标距。一般取 $5d$ 或 $10d$, d 为钢筋直径,相应的延伸率分别用 δ_5 或 δ_{10} 表示;

l ——试件拉断后重新拼合起来量测的标距。即试件产生残余变形后的标距。

延伸率是反映钢筋塑性性能的指标,钢筋的延伸率越大,其塑性性能越好。

5. 冷弯

钢筋冷弯是另一个反映钢筋塑性性能的指标。它是在常温下将钢筋绕一直径为 D 的钢辊弯折一定角度 α 而不出现裂纹、鳞落或断裂的试验来反映钢筋塑性性能。若 D 越小, α 越大,则该钢筋的塑性性能就越好。

2.1.3 钢筋的疲劳

钢筋的疲劳是指钢筋在承受重复并带有周期性动荷载作用下,经过一定次数后,钢筋由原塑性破坏变成脆性突然断裂破坏的现象。钢筋的疲劳强度是指在某一规定疲劳应力幅(一次循环应力中最大和最小应力的差值)内,经受一定次数荷载循环后发生疲劳破坏的最大应力值。

钢筋疲劳断裂的原因,一般认为是重复荷载作用下,由于钢筋内部和外部的缺陷引起的应力集中。高应力作用下钢筋中弱晶粒滑移,产生疲劳裂纹,随着重复作用次数的增加,疲劳裂纹的不断扩展,最终导致钢筋断裂。

钢筋疲劳强度与疲劳应力幅、最小应力值的大小、钢筋外表面几何尺寸和形状、钢筋直径、钢筋强度等级、钢筋轧制工艺和试验方法等因素有关。由于影响钢筋疲劳强度的因素很多,钢筋疲劳强度的试验结果是很离散的。国内外钢筋疲劳试验资料表明,影响钢筋疲劳强度的主要因素为钢筋疲劳应力幅。因此,《规范》给出考虑疲劳应力比的钢筋疲劳应力幅限值。钢筋疲劳应力比值 ρ_s^f 按下列公式计算:

$$\rho_s^f = \frac{\sigma_{s,\min}^f}{\sigma_{s,\max}^f} \quad (2-3)$$

式中, $\sigma_{s,\min}^f$ 、 $\sigma_{s,\max}^f$ ——构件疲劳验算时,同一层钢筋的最小应力、最大应力。

不同钢筋品种和强度等级的钢筋疲劳应力幅限值见附表6和附表7。

在确定钢筋混凝土构件在正常使用阶段的疲劳应力幅限值时,需要确定重复动荷载的循环次数,我国要求满足循环次数为200万次,即对不同的疲劳应力比值,满足循环次数为200万次条件下的钢筋最大应力值为钢筋的疲劳强度。

2.1.4 钢筋的选择

为了确保混凝土结构具有良好的工作性能,设计时应综合考虑所设计结构的功能要求、结构的工作环境、荷载特性、钢筋的物理力学性能、施工技术及工程造价等因素,选用与之相适应的钢筋。一般情况下,应选用强度高、塑性性能好、可焊性好及与混凝土有良好的黏结性能的钢筋。

1. 钢筋的强度

所谓钢筋强度指标是指钢筋的屈服强度及极限强度。钢筋屈服强度是影响钢筋混凝土结构构件设计承载力的主要因素,设计时采用高强度钢筋可以节约钢材,取得较好的经济效益。但是,对于目前实际工程中广泛采用的钢筋,强度越高,其塑性及可焊性越差。此外,采用一般冷加工方法虽然可以提高母材的屈服强度,但屈服强度提高的越高,其塑性及强屈比降低越大,钢筋的强度储备越小,应用时可参照相关的行业标准执行。

2. 钢筋的塑性

钢筋良好的塑性性能是保证钢筋混凝土结构具有较好延性的前提条件,这一点对于建造在地震设防区的结构尤为重要。钢筋的延伸率和冷弯性能是反映钢筋塑性性能的主要指标。

3. 钢筋的可焊性

焊接是实际工程中钢筋与钢筋连接的方式之一。钢筋可焊性好是保证钢筋焊接连接可靠性的基础,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. 钢筋与混凝土的黏结力

黏结力是保证钢筋与混凝土共同工作的前提条件,同时也是保证混凝土结构正常工作的基础。钢筋的表面特征及混凝土的强度等级是影响黏结力的主要因素。此外,钢筋的锚固和有关的构造措施对黏结力也有较大影响。

2.2 混凝土

混凝土是以水泥为主要胶结材料,拌合一定比例的砂、石材和水,有时还加入少量的外加剂,经过搅拌、注模、振捣、养护等工序后,逐渐凝结硬化而成的人工石材。各组分材料的性质和相互比例,以及制备方法和硬化过程中的环境因素,都将对混凝土的内部结构产生不同程度的影响。因此,混凝土比单一性材料具有更为复杂多变的力学性能。本节仅侧重介绍混凝土在不同受荷方式下的强度和变形性能。

2.2.1 单轴应力状态下混凝土的强度

1. 混凝土立方体强度

混凝土立方体试件的强度比较稳定,所以我国《规范》将立方体强度值作为混凝土强度