

混凝土结构学

上册

(修订版)

丁大钧 主编

南京工学院《混凝土结构学》编写组编

路湛沁 审校

中国铁道出版社

1992年·北京

- A ——构件截面面积；
 A_0 ——构件换算截面面积；
 A_n ——构件净截面面积；
 A_s 、 B_s' ——受拉区、受压区纵向非预应力钢筋的截面面积；
 A_p 、 A_p' ——受拉区、受压区纵向预应力钢筋的截面面积；
 A_{sv1} 、 A_{st1} ——在受剪、受扭计算中单肢箍筋的截面面积；
 A_{sv} 、 A_{sh} ——同一截面内各肢竖向、水平箍筋的全部截面面积；
 A_{sb} 、 A_{pb} ——同一弯起平面内非预应力、预应力弯起钢筋的截面面积；
 A_l ——混凝土局部受压面积；
 A_{cor} ——钢筋网、螺旋配筋或箍筋范围内的混凝土核芯面积；
 W ——截面受拉边缘的弹性抵抗矩；
 W_0 ——换算截面受拉边缘的弹性抵抗矩；
 W_n ——净截面受拉边缘的弹性抵抗矩；
 I ——截面惯性矩；
 I_0 ——换算截面惯性矩；
 I_n ——净截面惯性矩。

计算系数及其它

- α_c ——混凝土线膨胀系数；
 α_{ct} ——混凝土拉应力限制系数；
 α_E ——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；
 β ——混凝土局部受压强度的提高系数；
 γ ——受拉区混凝土塑性影响系数；
 η ——偏心受压构件考虑挠曲影响的轴向力偏心距增大系数；
 λ ——计算截面的剪跨比；
 μ ——摩擦系数；
 ρ ——纵向受拉钢筋配筋率；
 ρ_{sv} 、 ρ_{sh} ——竖向箍筋、水平箍筋或竖向分布钢筋、水平分布钢筋的配筋率；
 ρ_v ——间接钢筋或箍筋的体积配筋率；
 φ ——轴心受压构件的稳定系数；
 θ ——考虑荷载长期效应组合对挠度增大的影响系数；
 ψ ——裂缝间纵向受拉钢筋应变不均匀系数。

(京)新登字063号

内 容 简 介

本书是按照新的《混凝土结构设计规范》(GBJ 10-89)编写的。本书上册在88年第1版的基础上,经过修订而再版。全书共分上、中、下三册。上册分十一章,主要阐述了:材料的物理力学性能及基于概率理论的极限状态设计方法;轴心及偏心受力构件、受弯构件的正截面和斜截面以及受扭构件的强度计算;构件的拉裂度、裂缝宽度和变形的验算;以及预应力混凝土结构、部分预应力混凝土结构构件和叠合受弯构件的计算。书后附有设计用表。全书采用了新的术语、新的符号以及新的计量单位。

本书可供教学、设计和科研工作者在学习和运用新规范、新资料时使用,也可作为高等院校有关专业的教材。

混 凝 土 结 构 学

上册(修订版)

丁大钧 主编

路湛沁 审校

*

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 翁大厚 许虹进 封面设计 安宏

各地新华书店经售

北京京辉印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 18.75 字数: 457千

1988年5月第1版

1992年12月 第2版 1992年12月第3次印刷

印数: 14001—16000册

ISBN7-113-01015-6/TU·222 定价: 11.55元

原 序

《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ10—74)颁布使用以来已经历了十四年,对我国建筑结构的设计起了很大的作用。但随着国内外生产和科研的发展,对原规范不得不进行修订和补充。为了满足教学、设计和科研工作参考的需要,于1984年9月与中国铁道出版社签订了约稿合同,着手组织按新规范编写《混凝土结构学》一书。我们先提出编写大纲初稿,经与出版社反复讨论和修改,最后予以确定。计划本书分为三册,上册阐明基本理论,中册论述楼盖、框架结构的设计,下册介绍特种结构的设计。除钢筋混凝土基本构件等有关内容按新的《混凝土结构设计规范》(GBJ10—89)编写并采用新的符号和法定计量单位外,其余内容亦都是介绍有关新的规范、规程和新资料。全书计约100余万字。任务确定后,当时在南京工学院土木系建筑结构教研组内进行酝酿,根据原提纲,拟订了详细章节目录并进行了分工。1985年春开始按新规范征求意见稿着手编写初稿。1986年又按送审稿进行修改,现按正式颁布的新规范校正。

上、中、下三册分别由袁必果副教授、程文灏教授、童启明副教授分任副主编,最后由主编审定,下面列出上册各章执笔者名单:

第一章(丁大钧),第二章(金芷生),第三章(黄兴棣),第四章(程文灏),第五、七、十一章(蓝宗建)第八、九章(蒋永生),第六、十章(吕志涛)。至于中册及下册的执笔者名单将分别在各册中列出。

编写本书的指导思想是提供教学、设计和科研工作者在学习和使用新规范和新资料时参考,兼顾高等院校有关专业选作教材之用。因此在章节编排、内容取舍和述理的广度和深度上都适当考虑了上述几个方面的要求;立足国内,同时也有选择地对国外的一些成果作必要的简介,以便使读者大致了解国外有关情况和发展趋向。

由于我们水平限制,同时对组织众多作者编写同一书稿也缺乏经验,统稿工作确非易事,袁、程、童三位同志在这方面已进行或将进行很多细致的工作。限于本人水平和经验,书中将可能存在这样或那样的缺点和错误,主编者自不能辞其咎,因为这是由于最后审定环节未把握住所造成的。欢迎读者提出批评指正,再版时当予更正,同时也使我们得到提高。幸甚!

最后对西南交通大学路湛沁教授在百忙中拨冗对本书惠予审查,并提出许多宝贵意见,使我们得以进行必要的修正表示衷心的感谢,对我院退休的李漪穠老师傅在七十余高龄时犹无间寒暑地为本书精心描绘插图,同样表示衷心的感谢,对土木系结构试验室邵扣霞同志在本书编写过程中所做的工作亦表示感谢。

丁大钧 于东南大学

一九八六年七月

基本符号

材料性能

- E_c ——混凝土弹性模量；
 E'_c ——混凝土疲劳变形模量；
 G_c ——混凝土剪变模量；
 γ_c ——混凝土泊松比；
 E_s ——钢筋弹性模量；
 C_{20} ——表示立方体强度标准值为 20N/mm^2 的混凝土强度等级；
 f_{cu} ——边长为 150mm 的混凝土立方体抗压强度；
 f'_{cu} ——边长为 150mm 的施工阶段混凝土立方体抗压强度；
 $f_{cu,k}$ ——边长为 150mm 的混凝土立方体抗压强度标准值；
 f_{ck}, f_c ——混凝土轴心抗压强度标准值、设计值；
 f_{cmk}, f_{cm} ——混凝土弯曲抗压强度标准值、设计值；
 f_{tk}, f_t ——混凝土轴心抗拉强度标准值、设计值；
 f'_{ck}, f'_{tk} ——施工阶段的混凝土轴心抗压、抗拉强度标准值；
 f_{yk} ——普通钢筋强度标准值；
 f_y, f'_y ——普通钢筋的抗拉、抗压强度设计值；
 f_{pyk}, f_{py} ——预应力钢筋的抗拉、抗压强度标准值、设计值。

外力、内力和变形

- N ——轴向力设计值；
 N_s, N_l ——按荷载的短期效应组合、长期效应组合计算的轴向力值；
 N_p ——后张法构件预应力钢筋反非预应力钢筋的合力；
 N_{p0} ——混凝土法向预应力为零时预应力钢筋的反非预应力钢筋；
 N_{u0} ——构件的轴心受压或轴心受拉承载力设计值；
 N_{ux}, N_{uy} ——轴向力作用于 x 轴、 y 轴的偏心受压或偏心受拉承载力设计值；
 M ——弯矩设计值；
 M_s, M_l ——按荷载的短期效应组合、长期效应组合计算的弯矩值；
 M_u ——构件的正截面受承载力弯设计值；
 M_{cr} ——受弯构件的正截面开裂弯矩值；
 T ——扭矩设计值；
 V ——剪力设计值；
 V_{cs} ——构件斜截面上混凝土和箍筋的受剪承载力设计值；

- F ——局部荷载设计值或集中反力设计值；
 σ_{sc} 、 σ_{lc} ——荷载的短期效应组合、长期效应组合下抗裂验算边缘的混凝土法向应力；
 σ_{pc} ——由预加应力产生的混凝土法向应力；
 σ_{tp} 、 σ_{cp} ——混凝土中的主拉应力、主压应力；
 $\sigma'_{c,max}$ 、 $\sigma'_{c,min}$ ——疲劳验算时受拉区或受压区边缘纤维混凝土的最大应力、最小应力；
 σ_s 、 σ'_s ——受拉区、受压区纵向非预应力钢筋的应力；
 σ_{con} ——预应力钢筋张拉控制应力；
 σ_p 、 σ'_p ——受拉区、受压区预应力钢筋在各个受力阶段的应力；
 σ_l 、 σ'_l ——受拉区、受压区预应力钢筋在相应阶段的预应力损失值；
 τ ——混凝土的剪应力；
 W_{max} ——考虑裂缝宽度分布的不均匀性和荷载长期效应组合影响的最大裂缝宽度；
 B ——受弯构件的截面刚度。

几何参数

- a 、 a' ——纵向受拉钢筋合力点、纵向受压钢筋合力点至截面近边的距离；
 a_s 、 a'_s ——纵向非预应力受拉钢筋合力点、受压钢筋合力点至截面近边的距离；
 a_p 、 a'_p ——受拉区纵向预应力钢筋合力点、受压区纵向预应力钢筋合力点至截面近边的距离；
 b ——矩形截面宽度，T形、I形截面的腹板宽度；
 b_f 、 b'_f ——T形或I形截面受拉区、受压区的翼缘宽度；
 d ——圆截面的直径或钢筋直径；
 c ——混凝土保护层厚度；
 e 、 e' ——轴向力作用点至纵向受拉钢筋合力点、纵向受压钢筋合力点的距离；
 e_o ——轴向力对截面重心的偏心距；
 e_a ——附加偏心距；
 e_i ——初始偏心距；
 h ——截面高度；
 h_o ——截面有效高度；
 h_f 、 h'_f ——T形或I形截面受拉区、受压区的翼缘高度；
 i ——回转半径；
 r_c ——曲率半径；
 l_a ——纵向受拉钢筋的最小锚固长度；
 l_o ——计算跨度或计算长度；
 s ——沿构件轴线方向上横向钢筋的间距，或螺旋筋的间距，或箍筋的间距；
 x ——混凝土受压区高度；
 y_o 、 y_n ——换算截面重心、净截面重心至所计算纤维的距离；
 z ——纵向受拉钢筋合力点至混凝土受压区合力点之间的距离；

目 录

基本符号	IX
① 绪 论	1
1.1 钢筋混凝土的本质	1
1.2 钢筋混凝土的主要优缺点	2
1.3 钢筋混凝土发展简史	3
1.4 钢筋混凝土在我国的应用和发展	7
1.4.1 基本建设	1.4.2 科学研究
1.4.3 规范制订	
1.5 国外钢筋混凝土结构简介	12
1.6 展 望	14
② 钢筋混凝土材料主要物理力学性能	17
2.1 混凝土	17
2.1.1 概述	2.1.2 混凝土的强度
2.1.3 混凝土的变形	2.1.4 混凝土的
2.1.5 混凝土的附加技术要求	2.1.6 高强混凝土
2.1.7 改性混凝土	
2.2 钢 筋	33
2.2.1 钢筋的种类和级别	2.2.2 钢筋的强度与变形
2.2.3 钢筋的接头	
2.3 钢筋的握裹与锚固	38
2.3.1 基本概念	2.3.2 握裹力试验
2.3.3 影响因素	2.3.4 钢筋的锚固
2.4 混凝土和钢筋混凝土的质量	41
③ 基于概率理论的极限状态设计方法	43
3.1 概 述	43
3.2 结构的功能和可靠度	45
3.2.1 结构的功能	3.2.2 结构的可靠度
3.2.3 设计基准期	
3.3 极限状态和极限状态方程	47
3.3.1 极限状态的定义和分类	3.3.2 承载能力极限状态
3.3.3 正常使用极	3.3.4 破坏——安全极限状态
3.3.5 极限状态方程	
3.4 失效概率和可靠指标	49
3.4.1 失效概率	3.4.2 可靠指标
3.4.3 设计可靠指标的确定	
3.5 极限状态设计表达式	52
3.6 材料强度设计指标和材料强度分项系数的确定	54
3.6.1 材料强度标准值	3.6.2 材料强度设计值及分项系数
3.7 混凝土结构使用寿命的预测	58
3.7.1 一般原则	3.7.2 钢筋锈蚀过程和估计寿命标准
④ 轴心受力构件的正截面承载力计算	61
4.1 轴心受拉构件受力的全 过程	61
4.2 轴心受拉构件的正截面承载力计算及配筋 构造	63

4.3	轴心受压短柱的破坏形式及其应力重分布	64
4.4	轴心受压长柱的破坏形式及稳定系数	66
4.5	配有纵筋和箍筋的轴心受压柱正截面承载力计算与构造	67
4.6	配有纵筋和螺旋筋的轴心受压柱正截面承载力计算与构造	69
4.7	轴心受压钢管混凝土柱	72
⑤	受弯构件正截面的承载力计算	74
5.1	受弯构件的一般构造要求	74
5.1.1	截面形式	5.1.2 截面尺寸
		5.1.3 混凝土保护层
		5.1.4 钢筋间距、直径和配筋率
5.2	受弯构件正截面受力全过程和破坏特征	76
5.2.1	适筋截面	5.2.2 超筋截面
		5.2.3 少筋截面
5.3	受弯构件正截面承载力计算的基本原则	78
5.3.1	基本假定	5.3.2 等效矩形应力图形和弯曲抗压强度
		5.3.3 适筋截面的适用条件
5.4	单筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	83
5.4.1	基本计算公式	5.4.2 计算方法
		5.4.3 计算表格的编制及应用
5.5	双筋矩形截面受弯构件正截面承载力计算	89
5.5.1	概述	5.5.2 基本计算公式
		5.5.3 计算方法
5.6	单筋T形截面受弯构件正截面承载力计算	95
5.6.1	概述	5.6.2 基本计算公式
		5.6.3 计算方法
5.7	双向受弯构件正截面承载力计算	101
5.7.1	概述	5.7.2 单筋矩形截面双向受弯构件正截面承载力计算
⑥	受弯构件斜截面的承载力计算	106
6.1	一般概念	106
6.2	无腹筋梁斜裂缝形成前后的应力状态	106
6.2.1	斜裂缝形成前的应力状态	6.2.2 斜裂缝形成后的应力状态
6.3	梁沿斜截面破坏的形态和机理	108
6.3.1	斜截面的破坏形态	6.3.2 斜截面的剪力传递和破坏机理
6.4	影响梁受剪承载力的主要因素	111
6.4.1	混凝土强度	6.4.2 剪跨比
		6.4.3 配箍率及箍筋强度
		6.4.4 纵筋配筋率
6.5	梁的斜截面受剪承载力计算	113
6.5.1	一般原则	6.5.2 无腹筋梁的受剪承载力
		6.5.3 仅配箍筋梁的受剪承载力
		6.5.4 弯起钢筋承受的剪力
		6.5.5 受剪设计计算方法
6.6	若干问题的说明	119
6.6.1	复杂加载下的梁	6.6.2 反向弯矩的影响
		6.6.3 翼缘的作用
		6.6.4 间接加载和间接支承
6.7	计算步骤及例题	120
6.7.1	截面选择(设计)	6.7.2 强度校核(复核)
6.8	抵抗弯矩图与纵筋的弯起和截断	124
6.8.1	抵抗弯矩图	6.8.2 纵向钢筋的弯起
		6.8.3 纵向钢筋的截断
6.9	构造要求	129

6.9.1 纵筋的锚固	6.9.2 箍筋	
⑦ 偏心受力构件的承载力计算		134
7.1 概 述		134
7.2 偏心受力构件的一般构造要求		135
7.2.1 截面形式和尺寸	7.2.2 纵向钢筋	7.2.3 箍筋
7.3 偏心受压构件正截面的受力特点和破坏特征		36
7.3.1 受拉破坏(大偏心受压破坏)	7.3.2 受压破坏(小偏心受压破坏)	
7.4 偏心受压构件的纵向挠曲		138
7.4.1 基本概念	7.4.2 偏心受压构件的破坏类型	7.4.3 轴向力偏心距增大系数
7.5 偏心受压构件正截面承载力计算的基本原则		141
7.5.1 基本假定	7.5.2 两种破坏形态的界限	7.5.3 轴向力的初始偏心距
7.6 矩形截面偏心受压构件正截面承载力计算		142
7.6.1 基本计算公式	7.6.2 不对称配筋矩形截面的计算方法	7.6.3 对称配筋矩形截面的计算方法
7.7 工形截面偏心受压构件正截面承载力计算		156
7.7.1 基本计算公式	7.7.2 对称配筋工形截面偏心受压构件正截面承载力计算	
7.8 矩形截面双向偏心受压构件正截面承载力计算		160
7.8.1 倪克勤方法	7.8.2 直接设计法	
7.9 偏心受拉构件正截面承载力计算		165
7.9.1 矩形截面大偏心受拉构件正截面的承载力计算	7.9.2 矩形截面小偏心受拉构件正截面的承载力计算	7.9.3 矩形截面双向偏心受拉构件正截面承载能力的计算
7.10 偏心受力构件斜截面承载力计算		167
7.10.1 偏心受压构件斜截面抗剪能力计算	7.10.2 偏心受拉构件斜截面抗剪能力计算	
⑧ 扭曲、截面承载力计算		172
8.1 概 述		172
8.2 钢筋混凝土受纯扭构件的承载力计算		173
8.2.1 矩形截面钢筋混凝土受纯扭构件的承载力计算	8.2.2 T形和工形截面钢筋混凝土纯扭构件的承载力计算	8.2.3 截面受扭塑性抵抗矩的计算
8.3 矩形截面钢筋混凝土受压、扭构件的承载力计算		175
8.4 钢筋混凝土受弯、剪、扭构件的承载力计算		176
8.5 截面尺寸限制条件及构造配筋界限		177
8.6 受扭钢筋的构造要求		177
⑨ 钢筋混凝土构件抗裂、裂缝宽度和变形验算		181
9.1 概 述		181
9.2 钢筋混凝土构件抗裂验算		181
9.2.1 轴心受拉构件	9.2.2 受弯构件	9.2.3 偏心受力构件
9.3 裂缝的发生、分布和开展的机理		185
9.4 裂缝宽度的验算		187
9.4.1 平均裂缝间距	9.4.2 平均裂缝宽度	9.4.3 最大裂缝宽度
9.5 弯矩—曲率关系和刚度		192

9.5.1	截面的弯矩——曲率关系和刚度	9.5.2	截面的平均应变、曲率和短期刚度
9.5.3	长期刚度计算		
9.6	构件的变形验算		196
9.7	配筋率对钢筋混凝土构件承载力、裂缝出现、裂缝宽度及变形的影响		199
⑩	预应力混凝土结构构件		202
10.1	概 述		202
10.1.1	预应力混凝土的基本概念	10.1.2	预应力混凝土与钢筋混凝土的比较
10.1.3	预应力混凝土结构的优点及应用范围		
10.2	预加应力的方法及锚具		205
10.2.1	先张法(在浇灌混凝土前张拉钢筋)	10.2.2	后张法(在混凝土结硬后的构件上张拉钢筋)
10.2.3	锚具		
10.3	预应力混凝土的材料		208
10.3.1	钢材	10.3.2	混凝土
10.3.3	灌浆材料		
10.4	张拉控制应力及预应力损失		209
10.4.1	张拉控制应力	10.4.2	预应力损失
10.5	预应力的传递长度和锚固区的局部承压		216
10.5.1	预应力的传递长度	10.5.2	锚固区的局部承压
10.6	预应力混凝土轴心受拉构件的计算		218
10.6.1	轴心受拉构件各阶段的应力分析	10.6.2	轴心受拉构件使用阶段的抗裂验算
10.6.3	轴心受拉构件承载力计算	10.6.4	轴心受拉构件施工阶段验算和局部承压验算
10.6.5	计算例题		
10.7	预应力混凝土受弯构件的计算		228
10.7.1	受弯构件各阶段的应力分析	10.7.2	受弯构件使用阶段的承载力计算
10.7.3	受弯构件使用阶段的抗裂验算	10.7.4	受弯构件的变形验算
10.7.5	受弯构件施工阶段的验算	10.7.6	计算例题
10.8	预应力混凝土受扭构件的承载力计算		245
10.9	预应力混凝土构件的构造要求		246
10.9.1	一般规定	10.9.2	先张法构件的构造要求
10.9.3	后张法构件的构造要求		
10.10	部分预应力混凝土构件的计算和构造		250
10.10.1	概述	10.10.2	施加部分预应力的方法和非预应力钢筋的配置
10.10.3	预应力度及部分预应力构件的分类	10.10.4	设计计算
10.10.5	部分预应力混凝土的构造要求		
⑪	钢筋混凝土和预应力混凝土叠合受弯构件的设计		259
11.1	概 述		259
11.2	叠合受弯构件正截面的受力特点和破坏特征		259
11.3	钢筋混凝土叠合受弯构件按承载能力极限状态的计算		261
11.3.1	正截面抗弯能力计算	11.3.2	斜截面抗剪能力计算
11.3.3	叠合面抗剪能力验算		
11.4	钢筋混凝土叠合受弯构件按正常使用极限状态的计算		263
11.4.1	受拉钢筋应力的计算及其控制	11.4.2	裂缝宽度的验算
11.4.3	挠度的验算		
11.5	预应力混凝土叠合受弯构件按承载能力极限状态的计算		270

11.5.1 正截面受弯能力计算	11.5.2 斜截面受剪能力计算	11.5.3 叠合面 抗剪能力的验算	
11.6 预应力混凝土叠合受弯构件按正常使用极限状态的计算			271
11.6.1 抗裂验算	11.6.2 受拉钢筋受力的计算及其控制	11.6.3 裂缝宽度 验算	
11.6.4 挠度验算			
附表			277

混凝土结构学 (上册)

1

绪 论

1.1 钢筋混凝土的本质

钢筋混凝土是由两种力学性能大不相同的材料——钢筋和混凝土结合成整体，共同发挥作用的一种建筑材料。混凝土结硬后如同石料，其抗压强度很高，抗拉强度很低，而钢筋的抗压和抗拉强度都很高。

当混凝土梁承受荷载时，中和轴以上受压，以下受拉（图1-1a）。随荷载的逐渐增大，梁中的压应力和拉应力将不断增大；当荷载较小时，梁的受拉边缘混凝土拉应力未达到其抗拉强度，梁尚能承受此荷载。当荷载增至 P_{cr} 时，梁的受拉边缘混凝土的应变达到其极限拉应变时，尽管这时受压区混凝土的相应压应力还远小于其极限抗压强度，但梁在受拉边缘

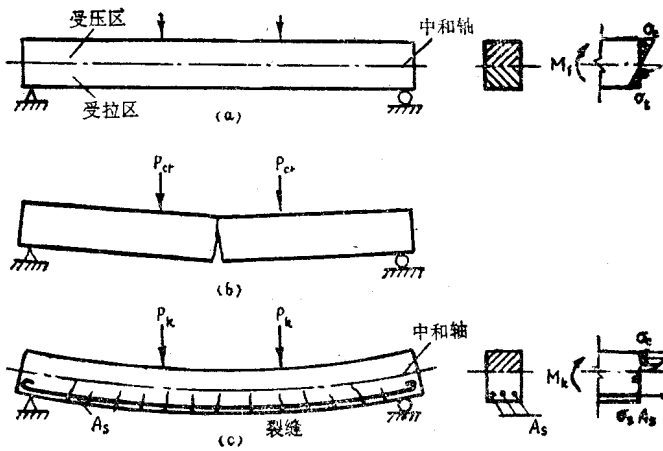


图 1-1

将出现裂缝并迅速向上伸展，梁瞬即破坏（图1-1b）。 P_{cr} 一般是不大的，这时抗压强度远未被充分利用。为了承受较大荷载，加大梁的截面尺寸不仅不经济，有时且不可能。因此人们自然想到要采取有效措施来加强混凝土梁的受拉区域，显然钢筋对混凝土是一种理想的加强材料。

从1824年发明了波特兰水泥到19世纪中叶，人们开始在构件受拉区配置抗拉强度高的钢筋，因而获得很好的增强效果。试验表明，在不大的荷载作用下，受拉区混凝土仍然开裂，在出现裂缝的截面处，受拉混凝土虽然脱离工作，但拉力可转由钢筋承受，因此钢筋混凝土梁不会象混凝土梁那样立即断裂，而能继续承担相当大的荷载，直至受拉钢筋应力达到屈服强度。一般还可增加一些荷载使受压区混凝土应变达到极限压应变而被压碎，梁始告破坏。应当指出，与混凝土梁相比较，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，大多数梁是带裂缝工作的（图1-1c），不过裂缝宽度通常可控制在允许的限度内，所以，一般说，钢筋混凝土梁在满载下出现裂缝是正常的现象。

钢筋混凝土的英文为Reinforced Concrete；法文为B'eton Arme'；德文，早期为Armiertes Beton，这些都是加强混凝土的意思。用“加强混凝土”这一称谓，并不束缚

人们的思路，因为除钢筋外，还可以利用其他抗拉强度和弹性模量高的合适材料来加——20年代前，在德国应用较普遍的为Eisenbeton，即为铁筋混凝土，苏联和日本分别沿用Железобетон和铁筋コンクリート，后来德国改用Stalbeton，我国则一直应用“钢筋混凝土”。近些年来，有用“加筋混凝土”的。在60年代后采用的Fibre Reinforced concrete，现在即译为“纤维加强混凝土”。

很早很早，人们就建立了对材料某些缺点进行加强的概念，如我国古代的长城，是用砂砾石拌和粘土修筑的，掺用砂后不仅提高粘土的抗压强度，也减小其干缩变形。在有悠久历史的粘土版筑墙中及土坯中加草筋也是为了加强其抗拉强度。

将钢筋与混凝土这两种性质大不相同的材料结合在一起使其共同受力并充分利用其各自的强度，不但是可能的，而且是有利的。

混凝土结硬后，埋设在其中的钢筋将与之结成整体，在荷载作用下，由于混凝土对钢筋的握裹使钢筋在混凝土内不致产生相对滑移，因而能发挥其屈服强度。所以混凝土对钢筋的握裹是保证两者共同工作的前提。

钢筋和混凝土的温度线膨胀系数相近或相差不大，前者为 1.2×10^{-5} ，后者与骨料种类有关，当石灰石时为 0.6×10^{-5} ，安山岩—— 0.65×10^{-5} 、浮石—— 0.7×10^{-5} 、辉绿岩—— 0.85×10^{-5} 、泡沫矿渣及花岗岩—— 0.9×10^{-5} 、玄武岩—— 0.95×10^{-5} ，砂岩—— 1.0×10^{-5} ；硬砂岩—— 1.1×10^{-5} 、石英岩—— 1.3×10^{-5} [1—1]。它们在一般温度变化时，不致产生过大的温度应力而破坏两者的整体性。

以上两点表明钢筋和混凝土共同工作的可能。

将钢筋埋设在混凝土内制成的钢筋混凝土，对钢筋来说，较钢结构有利，因为混凝土为不良的导热体，可防止钢筋受到剧烈的温度变化，所以对防火是有利的。此外，混凝土还包裹着钢筋，可使钢筋具有较好的保护，故在一般情况下可不致锈蚀，同时也可防止钢筋在低温下发生冷脆。可见，将两种材料组合使用也是有利的。

1.2 钢筋混凝土的主要优缺点

一、主要优点

(一) 就地取材 砂、石在钢筋混凝土体积中所占比重很大，但到处皆是，自可就地取材；在工业废料（如矿渣、粉煤灰等）比较多的地区，可将废料制成人造骨料用于钢筋混凝土中，这不但解决了废料处理，改善环境污染问题，而且可减轻结构自重。我国水泥产地的分布亦较普遍，而钢筋用量究为少数，且运输亦较方便。

(二) 耐久性 钢筋混凝土结构中混凝土的强度一般不仅不随时间而降低，且可不断增长（30年龄期时，可能增长达2倍以上），钢筋又为混凝土所包裹而不致锈蚀，所以在正常情况下钢筋混凝土的耐久性是很好的。对处于侵蚀性介质条件下的钢筋混凝土结构，可根据需要采取相应的措施以保证不同的技术要求。

(三) 耐火性 因混凝土是比较不良的传热体，钢筋为其所包裹而又有足够的保护层厚度，在火灾中将不至很快使强度软化而造成结构整体破坏；即使经长时间燃烧，其损坏一般均属表面性质。所以与钢结构比较，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。

(四) 整体性 钢筋混凝土、特别是现浇的混凝土结构，具有较好的整体性，故抗振动

性能较好, 并可根据设计控制其延性, 对在地震区的建筑物, 更有其重要意义; 同时对抗御强烈爆炸冲击波的作用和抵抗暴风浪的袭击, 亦同样可靠。

(五) 刚性 钢筋混凝土结构的刚性较大, 在使用荷载下, 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。

(六) 可塑性 由于新拌和的混凝土是可塑体, 所以根据需要可将钢筋置于设计好的模板或胎模内, 即可浇制成任何形状和尺寸的钢筋混凝土结构。

二、缺点

(一) 自重大 钢筋混凝土结构的截面尺寸较相应的钢结构大较多, 因此自重较大。这对于大跨度结构、高层建筑以及抗震都是不利的。采用强度高的轻混凝土, 可以适当改善这一缺点。随着高强度混凝土的发展, 这一缺点将会进一步得到改善。

(二) 抗裂性较差 混凝土易裂是一项重要缺点, 配置钢筋虽可大大提高构件的承载能力, 但抗裂荷载提高不多, 在使用荷载下往往带裂缝工作, 因此必要时需采用预应力混凝土。

(三) 费工大、耗用木料多 建造现浇的钢筋混凝土建筑, 费工较大, 制模板又耗用大量木材, 而且施工受到季节气候条件的限制; 浇制后必须养护, 工期较长, 现代采用工具式可多次重复使用的钢模板, 用滑模和升板法施工以及用蒸汽养护等工业化施工方法, 在一定程度上可改善这一缺点。

此外, 钢筋混凝土结构拆修比较困难, 必要时须采取定向爆破。至于混凝土的隔热和隔音性能较差, 也可采用有效的保温和隔音材料予以弥补。

1.3 钢筋混凝土发展简史

早在罗马时代就曾用天然水硬性材料——火山灰建造道路, 城墙和下水道^①, 在罗马还发现用铜杆加强的下水道。

随着社会的发展, 海上交通逐渐频繁, 人们须建造灯塔以示航向, 先发明了水硬性较强的水硬性石灰, 及至1824年终于发明了波特兰水泥 (Portland Cement), 因为用它做成的混凝土呈青灰色, 和英国波特兰岛上的岩石颜色相似。根据其成份, 我国现在通称为硅酸盐水泥。

因为钢筋混凝土作为建筑材料具有如上所述的优点, 故应用迅速推广, 在其诞生130多年内已经历了三个阶段, 而正进入第四个阶段。

第一阶段 这一阶段的特征为开始用钢筋混凝土建造各种楼板、柱、基础、挡墙以及刚架结构等, 而构件截面强度和内力计算都是按弹性理论进行的。

1850年法国人朗波 (Lambot) 制造了第一只钢筋混凝土小船。1854年英人威尔金生 (W.B. Wilkinson) 获得了一种钢筋混凝土楼板的专利权, 7年后法国工程师科瓦列 (Coignet) 著文阐述了这种新建筑的原理。1861年巴黎花匠蒙列 (Joseph Monier) 用水泥砂浆制作花盆, 在其中加置钢筋网以提高其强度。1867年蒙氏获得了做这种花盆的专利

^① 近期在甘肃省秦安县大地湾新石器时期文化遗址里出土了一处5千年前面积约100多m²的混凝土地面。它早于罗马时代用天然火山灰制作混凝土约3千年。经化学分析, 发现所用水泥成分和现代硅酸盐水泥基本相同。混凝土强度约为10N/mm²。混凝土样块中所含的陶粒轻骨料, 中空质轻, 制成的混凝土有保温、隔热等特点。这一发现揭示了我国建筑史上的一大奇迹 (见《人民日报》1986.1.24)。

权，而后又获得制造其他钢筋混凝土构件——梁、板及管等的专利权。对蒙氏的发明，通常称为“蒙列体系”。

在革命前的俄国，最早采用钢筋混凝土结构是在1886年，但推广很慢，直到1891年，在别列留布斯基（Н.А.Белелюбский）教授领导下进行了各种型式（析、管、拱及水箱等）钢筋混凝土结构试验后，才消除了许多工程师的顾虑。1895年马留加（И.Г.Малюга）教授发表了“获得最大强度水泥浆（混凝土）的配合及制造方法”的论文，建立了选择配合比的基本原则，包括混凝土强度与水灰比的关系。

十月革命后，国家工业化的任务使钢筋混凝土建筑在苏联获得迅速发展，这时建造了很多大型钢筋混凝土水电站。在工业与民用建筑中钢筋混凝土也得到了广泛的应用。

第二阶段 这一阶段的特征为空间结构及预应力混凝土结构的广泛研究和应用，同时构件截面强度开始按破坏阶段计算；对某些结构也开始考虑塑性变形引起的内力重分布。

1925年德国建造了第一个大型折板煤仓，1926年又建造了圆筒形长薄壳，此后双曲扁壳、双曲抛物面扭壳等相继问世。美国于1936年建造了短薄壳，此后很少应用，到50年代后才逐渐推广。

在苏联，从本世纪30年代起，钢筋混凝土空间薄壁结构已在建筑中应用，其中尤以短薄壳应用最广，长薄壳及折板结构也大量使用。苏联中央工业建筑科学研究院ЛИИИПС完成了重要的理论和实践的研究后，于1937年制订了“薄壳屋盖及楼板设计及计算规程”，对薄壳结构在工程实践中的较广泛采用起了很大的作用。

为了克服钢筋混凝土结构在使用荷载下出现裂缝的缺点，最早对钢筋混凝土预加压应力的概念是1888年德国工程师道伦（W.Doehring）提出的，但因当时钢材强度不高，故未获得实际结果。1928年法国工程师弗列西涅（E.Freyssinet）利用高强钢丝及高强度等级混凝土并施加高的预应力（大于 400N/mm^2 ）来制造预应力构件，才获得有实际意义的成功。

尽管1922年英国的狄森（Dyson）已对受弯构件提出了按破坏阶段计算公式，但苏联是最早制订按破坏阶段计算规范的。从1938年起即在工业与民用建筑中采用这个规范进行截面设计（巴西1953年开始按破坏阶段计算），这是钢筋混凝土史上的新发展。

1921年丹麦工程师殷捷尔斯列夫（A.Ingerslev）根据双向板“屈服线”上极限弯矩为常数的假定，最早提出塑性理论解，后来证明是正确的。1931年后丹麦工程师约翰逊（K.W.Johansen，后任技术大学教授）在这一领域里作了进一步的创造性工作，其成果陆续反映在其1943年的博士论文和1962年及1972年著作中。

美国1924年混凝土和钢筋混凝土标准规范联合委员会（Joint Committee on Standard Specifications of Concrete and Reinforced Concrete）的报告中，对单向连续板设计已在一定程度上考虑了塑性变形引起的内力重分布，美国混凝土学会ACI 1941年的钢筋混凝土建筑规范中对双向板也考虑了这个问题；在轴心受压柱中考虑混凝土塑性变形影响而对钢筋采取按（最小）屈服强度确定的许可应力，用弹性理论计算。

1950年苏联根据极限平衡理论制订了板及次梁考虑塑性变形引起的内力重分布的计算规程；1960年的规程又允许对主梁及单层刚架进行这种考虑。同样在无梁楼板计算中也允许考虑按塑性铰线法进行计算。

第三阶段 这一阶段的特征为：1. 普遍采用工业化施工方法；2. 应用范围不断扩大；3. 极限状态设计方法的采用和发展。

1. 第二次世界大战后城市的重建任务繁重，因此必须加快施工进度。对整体式钢筋混

凝土结构的工业化施工方法是：采用转动、滑动和移动模板及焊接钢筋网和焊接骨架，并采用自动倾卸车或混凝土泵运输集中拌和的混凝土。同时采用工厂生产的预制定型构件。这些措施不仅加快了工程进度，而且提高了工程质量。

2. 由于材料强度的不断提高和对混凝土性能的有效控制，钢筋混凝土和预应力混凝土的应用范围得以不断向大跨和超高层发展，高强度轻质混凝土的制成对此起了配合作用。例如西德法兰克福航空港 $270 \times 100\text{m}$ 大跨悬索飞机库20条135m的悬索板（板厚仅86mm）即系采用预应力轻混凝土制作；美国圣路易市轴长236m和223m的椭圆形的中心纪念馆的壳体、梁、柱结构均采用轻混凝土。美国芝加哥水塔广场旅馆大楼76层，总高262m，是目前在使用的世界上最高的钢筋混凝土房屋；但芝加哥另一混凝土建筑79层高311m的南威克塔楼已于1989年11月结顶。预应力混凝土梁式桥跨度最长的为1978年建成的阿根廷巴拉圭河（Rio Paraguai）桥，为三跨T构，主跨270m。在特种结构方面，混凝土的应用范围也在迅速扩大，如建造预应力高压容器（内压力可高于 20000kN/m^2 ）和钢结构比较，可节约造价60~86%；预应力冷却塔的高度有超过150m、直径超过100m的。此外还用预应力混凝土建造地下贮油罐和近海采油平台（英国北海采油平台海下深度达170m、底部直径达138m），加拿大和苏联已分别建成高度为553m及540m的预应力混凝土电视塔等高耸（塔桅）结构。

四十年代初发明了自应力水泥，但是在实际工程中得到应用还是近二十年的事。

3. 1955年苏联颁布了按极限状态的《混凝土及钢筋混凝土设计标准及技术规范》（ННТУ123—55），1958年出版了《预应力钢筋混凝土结构设计规程》（СН10—57）。有关方面对这一方法极为重视，经过不断研究和实践，目前已成为国际上设计方法的主要趋向，并向系统化和精确化发展。一些国际学术组织在促进极限状态设计方法的国际标准化和统一化方面进行了积极的工作。1970年欧洲混凝土委员会和国际预应力混凝土协会CEB-FIP（Comite' Europe'en du Be'ton-Fe'de'ration Internationale de la Pre'contrainte），在第六届国际预应力混凝土会议上提出了《混凝土结构设计施工建议》，这个国际性的建议对各国钢筋混凝土设计规范的影响较大。苏联、英国、美国的新规范中有不少内容引进了这个建议的基本观点。

美国在1956年前主要采用以弹性设计方法为基础的许可应力法，1963年起许可应力法和极限状态设计方法并用，1971年的钢筋混凝土设计规范才以极限状态设计法为主。

1970年前后、英国、联邦德国、加拿大、波兰及印度尼西亚等国家制定的规范对钢筋混凝土结构截面设计也分别采用极限状态设计法。

第四阶段 目前已进入或将进入新的第四阶段，其特征为：

发展工业化钢筋混凝土体系；

在设计规范中引入概率方法；

电子计算机辅助设计的程序化和优化设计的实际应用；

破坏机理和计算模式研究的加强；

“近代钢筋混凝土力学”这一新的分支学科逐步形成；

各学科间的相互渗透。

1. 近年来，国外建筑工业的发展较快，已从一般的构件标准设计向工业化建筑体系发展，趋向于一件多用或仅用较少类型的构件（梁板合一、墙柱合一构件）就能建造各类房屋。例如苏联推广大板结构体系；波兰亦以推广大型壁板体系为主；法国、罗马尼亚等国家主要推行大模板现浇结构体系等；南斯拉夫则推广预应力框架结构IMS体系^①。在工业建筑

中,有T形板体系、刚架体系。实践证明,工业化建筑体系在加快建设速度,降低建筑造价,提高施工质量等方面有较大的优越性。

2. 七十年代以来,以统计数学为基础的结构可靠性理论已逐渐进入工程实用阶段,许多国家正在采用或已经采用近似概率设计法,以改进现行的半统计半经验的半概率极限状态设计法,并取得显著的进展。例如,1974年加拿大制订了采用统一的极限状态理论,首次提出了以近似概率法作为设计规范中可靠度问题的准则,并按这一方法制订了钢结构和冷弯型钢结构设计规范(SAS16.1—1974和CSAS136~1974),钢筋混凝土结构设计规范亦已制订。由CEB、FIP等6个国际学术组织在1971年联合组成的“结构安全度联合委员会”(JCSS),通过广泛的国际合作,按近似概率极限状态设计法编制了《结构统一标准规范的国际体系》,从1978年开始分6卷陆续出版,国际标准化组织“建筑结构设计基础”委员会(ISO/TC98)于1980年提出了《结构设计可靠性的总原则》(ISO2394的第二次修订草案),推荐按近似概率设计方法。美国亦按此方法编制了钢筋混凝土结构设计规范(ACI 318—83)。全概率设计法也在积极研究中。

3. 国外电子计算机应用较早。利用电子计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD),加快速度,大大减轻手算工作量,同时便于革新设计,深入研究计算理论和方法,因而提高设计质量,是设计工作中的一项突破,它对计算方法和材性提出更高的要求,对学科的发展必然起到重要影响,其意义将不仅限于节省人力,加快设计进度方面,而必然对结构型式和构造(乃至施工)的创新具有深刻意义。我国在70年代后期逐步在实践中应用,但近几年来发展迅速,已编制了很多典型结构的标准程序,不仅可进行结构分析,也可同时进行截面选择。国外还发展有自动化结构设计语言(Automatic Structural Design Language)如Mcdonnell Douglas公司的MCAUTO STRUDL,可用于静力和动力分析,模式制备(Model Generation),预处理和后处理图解(Pre-and Postprocessing Graphics),规范校核和构件选择及有限元计算等很多方面,可大量节约总费用和时间。此外,优化设计在国外是50年代发展起来的,并陆续编制有很多在各种约束条件(包括最少配筋)下优化设计程序。我国也大约在70年代后期开始在工程中获得应用,可节约材料和降低造价,特别是对非常用的和复杂的结构节约更多,如对某高压输电塔(钢结构)进行优化设计,节约钢材达20%左右;又如上海机电院使空腹屋架减轻重量30%以上。

4. 研究破坏机理,特别是从微观方面进行研究,为采取改善材性措施提供正确的途径。例如我们知道混凝土内存在着很多空隙,而结晶的水泥石和骨料间存在初始微裂缝,切片在电子显微镜下观察,可充分证明这一点。用聚合物浸渍的方法,不仅填补了空隙使混凝土更坚实,从而获得了一系列为工程中所需要的特性,如提高抗渗性和耐冻性等。同时由于增强了粘结料与骨料界面的粘结,使破坏主要沿骨料本身发生,这样就大大提高了混凝土的抗拉、压强度。

计算模式的研究使能正确建立计算公式。譬如在正截面强度计算中,统一采取平截面假定,这不仅能比较正确地确定各类钢筋的超筋梁界限,而且对小偏心受压构件的计算能较好地反映实际钢筋应力情况,避免了经验公式的局限性。

当然在这两个方面还有很多工作要做。

5. 由于电算的迅速发展使复杂的数学运算成为可能。六十年代后期已开始将有限元法

① 参见国家建委建研院情报所:“南斯拉夫IMS预应力框架结构体系”,《建筑技术》,1979.3。