

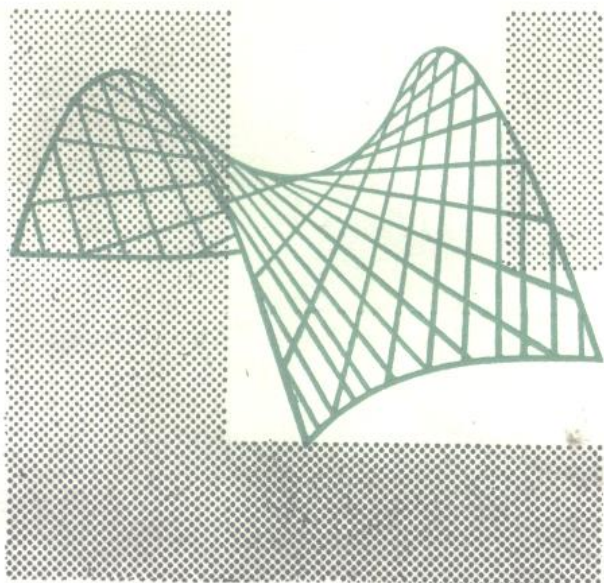
高等学校试用教材

混凝土 结构

(上册)

天津大学 同济大学 东南大学 主编
清华大学 主审

● 中国建筑工业出版社



高等学校试用教材

混凝土结构

(上册)

天津大学	同济大学	东南大学	主编
于庆荣	颜德姮	程文瀟	
清华大学			主审
江见鲸			

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本教材分上、下两册。上册内容11章：绪论、材性、计算原则、轴心受力构件、受弯构件正截面抗弯、受弯构件斜截面抗剪、受扭构件、偏心受力构件、刚度裂缝、预应力混凝土梁板结构。下册3章：单层厂房、框架结构、高层结构。

本书经建设部教育司审批作为高等学校试用教材，可作为土木结构专业、建筑工程专业的高等学校教材。也可供土建设计、施工技术人员参考。

2427/10

高等学校试用教材

混凝土结构

(上册)

天津大学 同济大学 东南大学 主编
于庆荣 颜德姮 程文瀾
清华大学 江见鲸 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

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:24½ 字数:595千字

1994年6月第一版 1997年6月第二次印刷

印数:21,101—38,100册 定价:20.00元

ISBN7-112-02181-2

TU·1673 (7201)

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

本书系根据全国高等学校建筑学科专业指导委员会审定的“工业与民用建筑和建筑结构工程专业教学大纲”的要求编写。内容包括：钢筋混凝土结构的材料力学性能，基本计算原则，以及轴心受力、弯、剪、扭、偏心受力、刚度裂缝，预应力混凝土、梁板结构、单层、多层、高层的结构与构件的计算理论、设计方法和构造要求。

全书是按照我国新颁布的国家标准《混凝土结构设计规范》（GBJ10—89）及《建筑抗震设计规范》（GBJ11—89）编写的。因此，在计算体系、设计方法等方面都作了较大的改变。为了便于学生理解基本概念和理论，并体现教材先进性，书中引用了国内外先进的科学技术成果。

本书编写的特点是：符合教学大纲的要求；贯彻以教学为主、少而精的原则；体现了长期积累的教学经验；注意了与相关的其他课程与教材的不重复，但又有关照和补充。本书可作为大专院校的教材和工程技术人员的参考。

参加本书编写的有：陈云霞（第一章，第二章），姚崇德（第三章），曹祖同（第四章，第七章），车宏亚、于庆荣（第五章），顾蕙若（第六章），康谷贻（第八章），蒋永生（第九章），高莲娣、颜德姮（第十章），袁必果、童启明（第十一章），黄兴棣、程文瀾（第十二章），张建荣（第十三章）。本书主编：天津大学于庆荣、同济大学颜德姮、东南大学程文瀾，主审：清华大学江见鲸。书中不妥甚至错误之处，恳请读者批评指正。

编者

目 录

第一章 绪论	1
第一节 钢筋混凝土的一般概念及特点	1
第二节 钢筋混凝土的发展简况及其应用.....	2
第三节 我国钢筋混凝土的发展	5
第二章 钢筋混凝土材料的力学性能	9
第一节 钢筋	9
一、钢筋的强度与变形.....	9
二、钢筋的成份、级别、品种.....	10
三、冷加工的钢筋.....	11
四、钢筋的形式.....	12
五、钢筋应力-应变曲线的数学模型	12
六、钢筋混凝土结构对钢筋性能的要求.....	14
第二节 混凝土	14
一、混凝土的组成结构.....	14
二、单向受力状态下混凝土的强度.....	15
三、复合受力状态下混凝土的强度.....	20
四、混凝土的变形性能.....	21
第三节 钢筋与混凝土之间的粘结	31
一、光面钢筋的粘结性能.....	31
二、变形钢筋的粘结性能.....	33
参考文献	37
第三章 钢筋混凝土结构基本计算原则	38
第一节 结构与结构设计.....	38
一、结构的组成和安全等级.....	38
二、建筑结构的性能要求和设计的目的.....	39
第二节 极限状态	39
一、极限状态的概念.....	39
二、极限状态的分类.....	40
第三节 荷载、承载力、可靠性与可靠度.....	40
一、荷载与作用	40
二、结构构件的承载力.....	41
三、结构的可靠性与可靠度.....	41
第四节 随机变量的统计特征值	42
第五节 概率极限状态设计法	45
第六节 实用设计表达式.....	47

一、承载能力极限状态实用设计表达式	47
二、正常使用极限状态实用设计表达式	48
第七节 材料强度和荷载的取值	50
一、钢筋抗拉强度标准值	50
二、混凝土立方体抗压强度标准值	51
三、钢筋和混凝土强度的分项系数	51
四、荷载的标准值和分项系数	51
第八节 钢筋混凝土结构设计方法的演变	52
参考文献	52
第四章 轴心受力构件的承载力计算	54
第一节 轴心受压构件的承载力计算	54
一、配有纵筋和箍筋柱的承载力计算	54
二、配有纵筋和螺旋式(或焊接环式)箍筋柱的承载力计算	60
第二节 轴心受拉构件的承载力计算	63
一、受力过程和破坏特征	63
二、承载力计算公式	61
参考文献	61
第五章 受弯构件正截面的承载力计算	65
第一节 试验研究分析	65
一、一般钢筋混凝土梁正截面工作的三个阶段	65
二、钢筋混凝土梁正截面的破坏形式	68
第二节 正截面受弯承载力的一般计算方法	70
一、基本假定	70
二、基本计算公式	71
三、等效矩形应力图形	72
四、弯曲抗压强度	73
五、适筋梁与超筋梁的界限及最大配筋率	74
六、适筋梁与少筋梁的界限及最小配筋率	75
第三节 单筋矩形截面受弯构件的承载力计算与截面构造	75
一、基本计算公式	75
二、截面构造	77
三、计算方法	78
第四节 双筋矩形截面受弯构件的承载力计算	84
一、概述	84
二、计算公式与适用条件	84
三、计算方法	85
第五节 T形截面受弯构件的承载力计算	90
一、概述	90
二、计算公式及适用条件	91
三、计算方法	98
第六节 受弯构件截面延性	98
一、概述	98

二、受弯构件弯矩-曲率关系试验曲线	99
三、受弯构件截面延性的计算分析	99
参考文献	101
第六章 受弯构件斜截面的承载力计算	102
第一节 概述	102
一、斜裂缝的形成	102
二、剪跨比的概念	103
三、梁沿斜截面破坏的三种形态	103
第二节 无腹筋简支梁的抗剪性能	105
一、斜裂缝出现前的受力状态	105
二、斜裂缝出现后的受力状态	106
三、影响斜截面抗剪性能的主要因素	106
第三节 有腹筋简支梁的抗剪性能	109
一、斜裂缝出现后的受力机制	109
二、箍筋的影响	110
第四节 有腹筋简支梁斜截面受剪承载力的计算	111
一、计算公式的表达式	111
二、受集中荷载为主的矩形截面简支梁的受剪承载力计算公式	111
三、一般情况下的矩形、T形和I字形截面简支梁的斜截面受剪承载力计算公式	113
四、设有弯起钢筋梁的受剪承载力计算公式	113
五、计算公式的适用范围	114
第五节 连续梁的抗剪性能及受剪承载力的计算	115
一、破坏特点	115
二、连续梁受剪承载力的计算	116
第六节 斜截面受剪承载力的设计方法及步骤	116
一、设计方法	116
二、设计步骤	117
三、实例	119
第七节 保证斜截面受弯承载力的构造措施	125
一、材料抵抗弯矩图	125
二、纵向钢筋的弯起	126
三、纵向钢筋的截断	127
四、纵向钢筋在支座处的锚固	129
五、箍筋的间距	130
六、纵向受力钢筋、弯筋和箍筋的其它构造要求	130
参考文献	132
第七章 偏心受力构件的承载力计算	133
第一节 偏心受压构件正截面的承载力计算	133
一、受力过程和破坏特征	133
二、偏心受压长柱的纵向弯曲影响	136
三、矩形截面大偏心受压构件正截面承载力计算公式	139
四、矩形截面小偏心受压构件正截面承载力计算公式	140

五、矩形截面不对称配筋的计算方法	142
六、矩形截面对称配筋的计算方法	154
七、I 形截面偏心受压构件的正截面承载力计算	160
八、双向偏心受压构件的正截面承载力计算	166
九、偏心受压构件截面的延性分析	169
十、构造要求	171
第二节 偏心受拉构件正截面的承载力计算	171
一、大偏心受拉构件正截面的承载力计算	172
二、小偏心受拉构件正截面的承载力计算	172
第三节 偏心受力构件斜截面的承载力计算	174
一、偏心受压构件斜截面的承载力计算	174
二、偏心受拉构件斜截面的承载力计算	175
参考文献	176
第八章 受扭构件承载力计算	177
第一节 概述	177
第二节 纯扭构件的试验研究	177
一、裂缝出现前的性能	177
二、裂缝出现后的性能	177
第三节 纯扭构件的承载力	180
一、开裂扭矩的计算	180
二、极限扭矩的计算	181
三、按《规范》的配筋计算方法	184
第四节 弯剪扭构件的承载力	186
一、试验研究及计算模型	186
二、按《规范》的配筋计算方法	187
三、配筋计算步骤	190
参考文献	194
第九章 混凝土构件的变形及裂缝宽度验算	195
第一节 正常使用极限状态的有关限值	195
一、混凝土结构构件的耐久性能	195
二、混凝土保护层最小厚度	197
三、最大裂缝宽度限值	197
四、混凝土构件的变形限值	198
第二节 受弯构件变形验算	199
一、截面抗弯刚度的主要特点	199
二、短期刚度 B_s	200
三、参数 η 、 ψ 和 ξ 的表达式	202
四、长期刚度 B_l	204
五、受弯构件的挠度验算	205
六、受弯构件挠度验算的几点说明	206
第三节 混凝土构件裂缝宽度验算	209
一、裂缝的出现、分布和开展	209

二、平均裂缝间距	210
三、平均裂缝宽度	212
四、最大裂缝宽度及其验算	211
第四节 混凝土构件的截面延性	217
一、延性概念	217
二、受弯构件的截面曲率延性系数	217
三、偏心受压构件截面曲率延性的分析	219
参考文献	220
第十章 预应力混凝土构件计算	221
第一节 概述	221
一、预应力混凝土基本概念	221
二、预应力混凝土构件不同计算方法简述	222
三、全预应力混凝土和部分预应力混凝土	223
四、有粘结预应力钢筋和无粘结预应力钢筋	224
五、预应力混凝土房屋结构工程实践	225
六、张拉预应力钢筋的方法	225
七、夹具和锚具	227
八、预应力混凝土材料	230
九、张拉控制应力	232
十、预应力损失	233
十一、预应力损失值的组合	241
十二、先张法构件预应力钢筋的传递长度及锚固长度	242
十三、后张法构件端部锚固区的局部受压验算	243
第二节 预应力混凝土轴心受拉构件的计算	246
一、轴心受拉构件各阶段的应力分析	246
二、轴心受拉构件使用阶段的计算	253
三、轴心受拉构件施工阶段的验算	255
第三节 预应力混凝土受弯构件的计算	259
一、受弯构件的应力分析	259
二、受弯构件使用阶段正截面承载力计算	264
三、受弯构件使用阶段正截面抗裂度验算	270
四、受弯构件正截面裂缝宽度验算	271
五、受弯构件斜截面受剪承载力计算	272
六、受弯构件斜截面抗裂度验算	274
七、受弯构件施工阶段的验算	276
八、受弯构件的变形验算	277
第四节 预应力混凝土构件的构造要求	280
一、一般规定	280
二、先张法构件的构造要求	283
三、后张法构件的构造要求	284
参考文献	293

第十一章 梁板结构	294
第一节 概述	294
一、单向板和双向板	294
二、肋梁楼盖和无梁楼盖	295
第二节 单向板肋梁楼盖	295
一、结构平面布置	296
二、荷载	296
三、钢筋混凝土连续梁、板按弹性方法计算内力	297
四、连续梁、板考虑内力重分布的设计	301
五、单向板肋梁楼盖的截面计算和构造	312
六、单向板肋梁楼盖设计例题	317
第三节 双向板肋梁楼盖	328
一、双向板的受力特点和主要试验结果	328
二、双向板按弹性理论的内力计算	330
三、双向板按塑性铰线法的内力计算	331
四、双向板的截面设计与构造要求	336
五、双向板支承梁的设计	337
六、双向板设计例题	338
第四节 无梁楼盖	343
一、概述	343
二、柱帽	344
三、无梁楼盖的内力分析	347
四、截面设计与构造要求	347
第五节 装配式楼盖	348
一、预制板和预制梁	349
二、预制构件的计算特点	350
三、铺板式楼盖的结构布置	351
四、铺板式楼盖的连接	351
第六节 楼梯和雨篷	355
一、楼梯	355
二、雨篷	362
参考文献	364
附 录	365
混凝土强度标准值	365
混凝土强度设计值	365
混凝土弹性模量 E_c	365
不同 ρ^t 值时混凝土的疲劳强度修正系数 γ_ρ	365
混凝土疲劳变形模量 E^t	366
钢筋强度标准值	366
钢丝、钢绞线强度标准值	366
钢筋强度设计值	367
钢丝、钢绞线强度设计值	367

钢筋弹性模量	368
钢筋混凝土结构中钢筋疲劳强度设计值	368
预应力钢筋的疲劳强度设计值	368
受弯构件允许挠度	369
裂缝控制等级、混凝土拉应力限制系数及最大裂缝宽度允许值	369
钢筋混凝土矩形截面受弯构件正截面受弯承载力计算系数表	370
钢筋混凝土构件中纵向受力钢筋最小配筋百分率	370
钢筋的计算截面面积及公称质量	371
截面抵抗矩塑性系数	372
等截面等跨连续梁在常用荷载作用下的内力系数表	373
双向板计算系数	379

第一章 绪 论

第一节 钢筋混凝土的一般概念及特点

钢筋混凝土是由钢筋和混凝土两种物理-力学性能完全不同的材料所组成。混凝土的抗压能力较强而抗拉能力却很弱。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1-1a、b中绘有两根截面尺寸、跨度、混凝土强度完全相同的简支梁，一根为素混凝土的，另一根则在梁的受拉区配有适量钢筋。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（图1-1a），所以梁的承载能力很低。对于在受拉区配置适量钢筋的梁，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应力仍由混凝土承受，与素混凝土梁不同，此时荷载仍可以继续增加，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，梁始告破坏。试验说明，配置在受拉区的钢筋明显地加强了受拉区的抗拉能力，从而使钢筋混凝土梁的承载能力比素混凝土梁的承载能力要提高很多。这样，钢筋与混凝土两种材料的强度均得到了较充分的利用。又如图1-1c所示，在受压的混凝土柱中配置了抗压强度较高的钢筋，以协助混凝土承受压力，从而可以缩小柱截面尺寸，或在同样截面尺寸情况下提高柱的承载力。

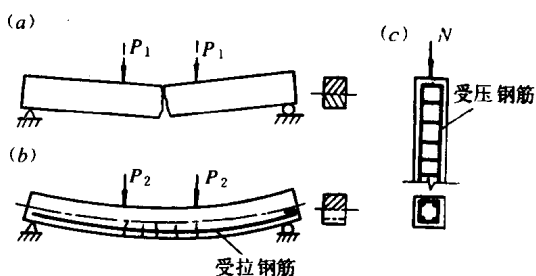


图 1-1 简支梁

钢筋和混凝土这两种性质不同的材料之所以能有效地结合在一起而共同工作，主要是由于混凝土硬化后钢筋与混凝土之间产生了良好的粘结力，使两者可靠地结合在一起，从而保证在外荷载的作用下，钢筋与相邻混凝土能够共同变形。其次，钢筋与混凝土两种材料的温度线膨胀系数的数值颇为接近（钢为 1.2×10^{-5} ；混凝土为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5}$ ），当温度变化时，不致产生较大的温度应力而破坏两者之间的粘结。

钢筋混凝土除了能合理利用钢筋和混凝土两种材料的性能外，尚有下列优点：

耐久性：在钢筋混凝土结构中，混凝土的强度随时间的增加而增长，且钢筋受混凝土的保护而不易锈蚀，所以钢筋混凝土的耐久性是很好的，不象钢结构那样需要经常的保养和维修。处于侵蚀性气体或受海水浸泡的钢筋混凝土结构，经过合理的设计及采取特殊的措施，一般也可满足工程需要。

耐火性：混凝土包裹在钢筋之外，起着保护作用。若有足够的保护层，就不致因火灾

使钢材很快达到软化的危险温度而造成结构整体破坏，与钢木结构相比，钢筋混凝土结构的耐火性很好。

整体性：钢筋混凝土结构特别是现浇的钢筋混凝土结构，由于整体性好，对于抵抗地震作用（或强烈爆炸时冲击波的作用）具有较好的性能。

可模性：钢筋混凝土可以根据需要浇制成各种形状和尺寸的结构。

就地取材：钢筋混凝土所用的原材料砂和石，一般均较易于就地取材。在工业废料（例如矿渣、粉煤灰等）比较多的地方，还可将工业废料制成人造骨料用于钢筋混凝土结构中。

节约钢材：钢筋混凝土结构合理地发挥了材料的性能，在某些情况下可以代替钢结构，从而节约钢材并降低造价。

由于钢筋混凝土具有上述一系列优点，在国内外的工程建设中均得到广泛的应用。

但是，钢筋混凝土结构也存在一些缺点：普通钢筋混凝土结构本身自重比钢结构要大。自重过大对于大跨度结构、高层建筑以及结构的抗震都是不利的；另外钢筋混凝土结构的抗裂性较差，在正常使用时往往带裂缝工作；而且建造较费工，现浇结构模板需耗用较多的木材，施工受到气候条件的限制，补强修复较困难；隔热隔声性能较差等等。这些缺点在一定条件下限制了钢筋混凝土结构的应用范围。不过随着人们对钢筋混凝土这门学科研究的不断提高，对上述一些缺点已经或正在逐步加以改善。例如，目前国内外均在大力研究轻质、高强混凝土以减轻混凝土的自重；采用预应力混凝土以减轻结构自重和提高构件的抗裂性；采用预制装配构件以节约模板加快施工速度；采用工业化的现浇施工方法以简化施工等等。

第二节 钢筋混凝土的发展简况及其应用

钢筋混凝土是在十九世纪中叶开始得到应用的，由于当时水泥和混凝土的质量都很差，同时设计计算理论尚未建立，所以发展比较缓慢。直到十九世纪末以后，随着生产的发展，以及试验工作的开展、计算理论的研究、材料及施工技术的改进，钢筋混凝土才得到了较快的发展。目前已成为现代工程建设中应用最广泛的建筑材料之一。

在工程应用方面，钢筋混凝土最初仅在最简单的结构物如拱、板等中使用。随着水泥和钢铁工业的发展，混凝土和钢材的质量不断改进、强度逐步提高。例如，在美国60年代使用的混凝土抗压强度平均为 28N/mm^2 ，70年代提高到 42N/mm^2 ，近年来一些特殊需要的结构混凝土抗压强度可达 $80\text{N/mm}^2 \sim 100\text{N/mm}^2$ ，而实验室做出的混凝土的抗压强度，最高已达 266N/mm^2 。前苏联70年代使用的钢材，平均屈服强度为 380N/mm^2 ，80年代提高到 420N/mm^2 ；美国在70年代的钢材平均屈服强度已达 420N/mm^2 。预应力钢筋所用强度则更高。这就为进一步扩大钢筋混凝土的应用范围创造了条件，特别是自70年代以来，很多国家已把高强度钢筋和高强度混凝土用于大跨、重型、高层结构中，在减轻自重、节约钢材上取得了良好的效果。

为了克服钢筋混凝土易于产生裂缝这一缺点，促成了预应力混凝土的出现。预应力混凝土的应用又对材料强度提出新的更高的要求，而高强度混凝土及钢材的发展反过来又促进了预应力混凝土结构应用范围的不断扩大。预应力混凝土除了用以改善一般的建筑结构

外(例如,增大跨度、减小截面等),还应用于高层建筑、桥隧建筑、海洋结构、压力容器、飞机跑道及公路路面等方面。现在,预应力混凝土的应用已不仅在某些范围内用来代替钢结构和改善普通钢筋混凝土结构,而在一些方面,例如原子能发电站的高温高压的大型压力容器,只能采用预应力混凝土结构建造才能保证安全。对防腐蚀有特殊要求的海洋结构(如采油平台),也非采用预应力混凝土和钢筋混凝土建造不可。

为改善钢筋混凝土自重大的缺点,世界各国经大力研究,发展了各种轻质混凝土(由胶结料、多孔粗骨料、多孔或密实的细骨料与水拌制而成,其干容重一般不大于 18kN/m^3),如陶粒混凝土、浮石混凝土、火山渣混凝土、膨胀矿渣混凝土等。轻质混凝土可在预制、预制-现浇和现浇的建筑结构中采用,例如可制成预制大型壁板、屋面板、折板以及现浇的薄壳、大跨、高层结构。但在应用中应当考虑到它的一些特殊性能(弹性模量低、收缩、徐变大等)。目前国外轻质混凝土用于承重结构的强度等级为C30~C60,其容重一般为 $14\text{kN/m}^3\sim 18\text{kN/m}^3$ 。国内常用的强度等级为C20, C30,也可配制C40或更高的强度,其容重一般为 $12\text{kN/m}^3\sim 18\text{kN/m}^3$ 。由轻混凝土制成的结构自重可比普通混凝土减少20%~30%。由于自重减轻,结构地震作用减小,因此,在地震区采用轻质混凝土结构可有效地减小地震作用,节约材料和造价。

近年来,国外建筑工业化的发展很快,已从采用一般的标准设计走向工业化建筑体系,趋向于做到一件多用或仅用较少几种类型的构件(如梁板合一构件、墙柱合一构件等)就能建造成各类房屋。实践充分显示出建筑工业化在加快建设速度、降低建筑造价、保证施工质量等方面的巨大优越性。在大力发展装配式钢筋混凝土结构体系的同时,有些国家还采用了工具式模板、机械化现浇与预制相结合,即装配整体式钢筋混凝土结构体系。

由于轻质、高强混凝土材料的发展以及结构设计理论水平的提高,使得钢筋混凝土结构应用跨度和高度都不断地增大。例如,目前世界上最高的钢筋混凝土建筑是朝鲜平壤市的柳京饭店,高达105层319.8m,其次为美国芝加哥水塔广场大厦,高76层262m;最高的全部轻混凝土结构的高层建筑是美国休士敦贝壳广场大厦高52层215m;预应力轻骨料混凝土建造的飞机库(西德)屋盖结构跨度达90m;预应力混凝土箱形截面桥梁跨度已达240m以上(日本浜各大桥);前苏联及加拿大分别建成了533m及549m高的预应力混凝土电视塔。

所有这些都显示了近代钢筋混凝土结构设计和施工水平日新月异的迅速发展。

此外,对于防射线混凝土、聚合物混凝土、自应力混凝土以及纤维混凝土(玻璃纤维、钢纤维)等也正在积极研究中,并在有特殊要求的结构上开始应用。美国混凝土学会2000年委员会设想到本世纪末,将使混凝土的性质获得飞跃的发展,把混凝土的拉、压强度比从目前的1/10提高到1/2,并且具有早强、体积稳定(收缩徐变小)的特性;同时还预言,那时的技术水平有可能建造600m~900m高的建筑,跨度达500m~600m的桥梁,以及海上浮动城市、海底城市、地下城市等。

钢筋混凝土在基本理论和设计方法研究方面也在不断发展中。在钢筋混凝土材料使用的早期,由于这种材料的性能及其内在规律尚未被人们认识,多数国家采用以弹性理论为基础的允许应力设计方法。这种设计方法采用远低于材料试验所得的钢筋屈服强度和混凝土极限抗压强度作为构件截面上钢筋和混凝土的允许应力,而构件内力及截面上的应力则按材料力学方法计算。实践证明,这种设计方法和实际情况往往有很大出入,不能正确揭

示钢筋混凝土性能的内在规律，所以现在绝大多数国家已不采用。

由于钢筋混凝土构件极限强度试验研究的进展，出现了按破坏阶段的设计方法，40年代在前苏联最先制订了按破坏阶段计算的规范。这种方法考虑了混凝土和钢材的塑性，采用混凝土的极限强度和钢材的屈服强度构成截面的破坏内力（截面承载力），使用阶段荷载作用下构件的内力仍按弹性理论计算，构件的安全性通过承载力总安全系数来保证，即使用阶段截面内力与总安全系数的乘积作为构件破坏内力（荷载）。此方法由于考虑了材料的塑性，更接近于钢筋混凝土工作的实际情况，比允许应力法前进了一步，但总安全系数的规定带有很大的经验性。

后来随着对荷载和材料变异性的研究，认识到结构在使用期限内作用力（荷载及其产生的效应）以及结构的承载能力均非定值，进而在50年代提出了按极限状态的设计方法，前苏联首先颁布了按极限状态计算的设计规范。按极限状态计算方法与破坏阶段计算方法的主要差别是规定了结构的极限状态，并用计算系数的形式代替了承载力总安全系数。所谓极限状态乃是到达此种状态时，结构或构件即失去抵抗外力的能力（承载能力极限状态）或使正常使用变为不可能（使用极限状态），对于不同的结构或构件应满足规定的极限状态要求。而计算系数则根据荷载、材料强度的变异性由统计经验分项确定，并考虑影响结构构件承载力的非统计因素。这种设计方法概念明确，考虑问题比较仔细，比按破坏阶段的设计方法更为合理。经过20多年的研究与实践，到了70年代已为多数国家所采用，其理论本身逐渐向系统化和精确化发展。

上述几种方法在对结构可靠度的处理上逐渐有所改进，特别是极限状态设计法，在确定设计参数时已部分地应用了概率的思想，这是一个较大的发展。然而，所有这些方法，或是将设计参数都看成不变的定值，或是仅仅在荷载和材料强度等设计参数的取值上分别地考虑了统计变异性，但都是采用以经验为主确定的安全系数来度量结构的可靠性，因此均属于“定值设计法”。随着结构设计方法的发展，为了合理规定结构及其构件的安全系数或分项计算系数，结构可靠性理论也得到逐步发展，并从70年代由理论转向实用，以统计分析确定的失效概率来度量结构的可靠性，这种方法称为“概率设计法”。目前已有许多国家采用了近似概率极限状态设计法，以改进现行的半经验半概率的极限状态设计法。例如，在1971年首先由欧洲混凝土委员会（CEB）等6个国际组织联合组成了结构安全度联合委员会（JOSS），通过广泛的国际合作，于1976年编制了接近似概率极限状态设计方法的“结构统一标准规范的国际体系”。1975年加拿大制订了采用统一的极限状态理论，首次提出以近似概率法作为设计规范中可靠度问题的准则，并按此方法编制了钢结构设计规范。

自60年代以来，由于电子计算机和有限元计算方法的广泛应用以及混凝土和钢筋混凝土弹塑性变形性质研究的深入，钢筋混凝土结构分析已从弹性计算理论向弹塑性计算理论发展，此外不少研究者明确提出，今后结构分析应当从孤立的单独构件转变到结构系统的整体空间分析，研究和掌握结构系统的破坏过程。

钢筋、混凝土材料以及钢筋混凝土构件基本性能的研究是发展钢筋混凝土结构理论的基础。近20年来，混凝土在单轴和多轴应力状态下本构关系的研究有了迅速的发展。此外通过试验和理论分析研究混凝土内部裂缝形成、发展与破坏机理，探讨多轴应力下混凝土强度，混凝土尺寸效应，混凝土与钢筋的粘结力和滑移，箍筋约束对混凝土强度变形的影

响等,以期最终建立起完整的强度理论。70年代以来,应用断裂力学研究混凝土裂缝扩展问题也十分活跃。在研究解决复杂应力状态下钢筋混凝土构件强度、裂缝和变形的计算问题以改进现有计算方法中,注重了在试验的基础上弄清破坏机理,寻求明确的力学模型,改进以经验为主的计算方法,力求使计算公式既具有一定的物理意义,又避免不必要的复杂计算。

随着预应力混凝土结构应用领域的不断扩大,在预应力混凝土设计原理方面,70年代以来发生了较大的变化。实践和研究表明,在使用状态下混凝土始终处于受压状态的所谓“全”预应力结构既非必要也不经济,从而提出了在使用状态下容许混凝土出现拉应力或微细裂缝的所谓“限值”预应力和“部分”预应力混凝土,设计者可以根据结构不同的使用要求,选择不同的预应力度设计成“全”预应力或“部分”预应力结构。部分预应力的优越性是很显著的,和普通钢筋混凝土相比,能更好的控制裂缝与挠度,消耗更少的材料;和“全”预应力相比,能更好地控制反拱,避免在全预应力中存在的因高应力造成的大量徐变。另外,部分预应力构件在破坏前具有较高的延性与能量吸收能力,既有利于抗震,造价往往也较低。

钢筋混凝土结构是一门综合性较强的应用科学。它的发展需综合运用数学、力学、材料及施工技术等科学的成就,并涉及许多工业部门,以建立自己完整的设计理论、结构体系和施工技术。近年来,由于电子计算技术及现代化的测试技术等新的科学技术成就被逐渐用于钢筋混凝土学科的研究中来,促使这门学科的面貌发生了巨大的变化,并将逐步向新的更高的阶段发展。

第三节 我国钢筋混凝土的发展

在十九世纪末和二十世纪初,我国也开始有了钢筋混凝土建筑物。但工程规模很小,建筑数量很少。解放以来,我国在落后的国民经济基础上进行了大规模的社会主义建设。随着社会主义建设事业的蓬勃发展,钢筋混凝土在我国各项工程建设中也得到迅速的发展和广泛的应用。

我国在一般民用建筑中已广泛地采用定型化、标准化的装配式钢筋混凝土构件。近年来,随着建筑工业化的发展以及墙体改革的推行,正大力发展装配式大板居住建筑。这是一种较新的建筑结构体系,它的施工速度快、机械化工业化程度高、抗震性能较好,70年代在北京、南宁等城市已大批兴建,目前很多城市也在推广。此外,在多层建筑中还广泛采用大模剪力墙承重结构外加挂板或外砌砖墙结构体系。各地还研究了框架轻板体系,最轻的每平方米仅为 $3\text{kN}\sim 5\text{kN}$ 。由于这种结构体系的自重大大减轻,不仅节约材料消耗,而且对于结构抗震具有显著的优越性。

此外,钢筋混凝土高层建筑在我国也有了较大的发展。继70年代北京饭店、广州白云宾馆和一批高层住宅如北京前三门大街、上海漕溪路住宅建筑群的兴建以后,进入80年代,高层建筑的发展加快了步伐,建筑体型和结构体系更为多样化,层数增多,高度加大。到90年1月为止,已建成和基本建成的高100m以上的钢筋混凝土高层建筑就有65幢,如上海展览中心主楼(剪力墙结构,高48层165m)、深圳国际贸易中心(筒中筒结构,高50层160m)、北京新世纪饭店(框筒结构,高32层111m)、深圳亚洲大酒店(巨型框

架结构,高32层114m),其中最高的建筑是广州的广东国际大厦,采用筒中筒结构,高200m,地上63层,地下2层。随着高层建筑的发展,高层建筑结构分析方法和试验研究工作,自70年代以来,在我国得到了极为迅速的发展,许多方面已达到或接近于国际水平。在总结设计、施工经验和科研成果的基础上,继1980年我国自行编制的《钢筋混凝土高层建筑结构设计与施工规定》(JZ102—79)后,1990年又制定了新的《钢筋混凝土高层建筑结构设计与施工规程》(JGJ3—91),理论研究工作的丰硕成果,将进一步促进我国高层建筑结构水平的提高。

在大跨度的公共建筑和工业建筑中,常采用钢筋混凝土桁架、门式刚架、拱、薄壳等结构形式。50年代我国就已设计和研究了60m跨度的预应力混凝土拱形桁架,用于北京民航检修机库和其它一些工程中;广州体育馆采用了现浇钢筋混凝土双铰门式刚架,跨度达49.8m;北京体育学院田径房采用了钢筋混凝土落地拱,跨度46.7m。另外,钢筋混凝土壳体结构也有一定发展。如广东番禺人民大会堂采用了直径55m的圆球壳;新疆机械厂直径为60m装配式钢筋混凝土椭圆球壳;另一种用于方形平面建筑的双曲扁壳,如北京火车站候车大厅(平面尺寸为35m×35m)和北京网球馆(平面尺寸为40m×40m);还有用于大连港运仓库23m×23m的组合扭壳等。

在工业建筑中已经广泛地采用了装配式钢筋混凝土及预应力混凝土。多年来,对于工业厂房进行了大量的结构改革和系统的试验研究工作,并积极推广标准设计及定型的配件。随着建筑工业化的发展,国内有些城市在全国通用构配件的基础上,选定、简化和统一构配件,采用配套的生产工艺和施工机械,使厂房的设计、生产和施工组成为大工业的生产过程,初步建立了适合本地区特点的单层及多层工业厂房建筑体系。另外,为适应当前工业生产机械化、自动化程度的不断提高,工艺设备的逐步更新及生产规模的日益扩大,正在研究发展具有较大灵活性的、扩大柱网尺寸的合并厂房。工业厂房的结构体系除通常采用的板、架(梁)、柱结构体系以及梁柱合一的门式刚架结构体系外,还出现了板架(梁)合一或板墙合一的板型结构和薄壁空间结构体系。如V形折板结构体系;双T形板结构体系;马鞍形壳体屋盖结构体系等。钢筋混凝土离心管结构是60年代开始发展起来的一项轻型承重结构,在我国已在很多省市推广应用,除用作单层厂房柱、屋架外,还用于多层框架结构、露天栈桥和塔架结构。此外,近年来研究的钢管混凝土制成的柱,具有强度高、延性大、抗震性能好、自重轻等优点,已在一些地区的工业厂房及地下结构中采用。在厂房的围护结构中已逐步使用大型工业墙板。为了节约用地,在工业建筑中多层工业厂房所占比重有逐渐增多的趋势,在多层工业厂房中除现浇框架结构体系以外,装配整体式多层框架结构体系已被普遍采用。并发展了整体预应力装配式板柱体系,由于其构件类型少、装配化程度高、整体性好、平面布置灵活,是一种有发展前途的结构体系。同时升板结构、滑模结构也有所发展。此外,如电视塔、水塔、水池、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。例如1991年已建成相当于9度抗震设防、高405m的天津电视塔,其高度为亚洲第一。

钢筋混凝土在水利工程、桥隧工程、地下结构工程中的应用也极为广泛。用钢筋混凝土建造的水闸、水电站、船坞和码头在我国已是星罗棋布。至1988年末,我国已建和部分投产的大型水电站已有26座,例如继新安江水电站、黄河刘家峡水电站以后,又有湖北丹江口水利枢纽工程、长江干流上的葛洲坝水利枢纽工程。其发电能力为271.5万千瓦,