

9

TV331-43
L31

高等学校水利类教材

水工混凝土结构

■李传才 主编

武汉大学出版社



内 容 提 要

本书按照高等学校水利水电类专业《水工钢筋混凝土结构》教学大纲和水利水电工程最新的各种标准和规范编写。主要内容有：混凝土结构材料的力学性能、混凝土结构的计算原则、混凝土基本构件设计的基本理论及应用、梁板结构、水电站厂房及刚架结构、水工非杆件结构等主要的水工钢筋混凝土结构的设计理论及应用。全书共十二章，各章均附有例题、习题和思考题。编写内容在满足教学大纲要求的基础上，还尽量反映最新的科研成果和进展。

本书是高等学校水利水电类专业本科的必修课教材，也可以作为土建类专业师生和各种设计、施工和科研单位的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水工混凝土结构/李传才主编. —武汉：武汉大学出版社，2001. 10

高等学校水利类教材

ISBN 7-307-03361-5

I. 水… II. 李… III. 水工结构：混凝土结构—高等学校—教材
IV. TV331

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 77508 号

责任编辑：瞿扬清

责任校对：张 昕

版式设计：支 笛

出版：武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件：wdp4@whu.edu.cn 网址：www.wdp.whu.edu.cn)

发行：新华书店湖北发行所

印刷：华中科技大学印刷厂

开本：787×1092 1/16 印张：32.125 字数：736千字

版次：2001年10月第1版 2001年10月第1次印刷

ISBN 7-307-03361-5/TV·9 定价：40.00元

版权所有，不得翻印；凡购我社的图书，如有缺页、倒页、脱页等质量问题者，请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

本书是根据高等学校水利水电类专业教学指导委员会建筑材料与建筑结构教学组《水工钢筋混凝土结构》课程教学大纲和中华人民共和国行业标准 DL/T5057-1996《水工混凝土结构设计规范》编写的。主要内容有：混凝土结构材料的力学性能，混凝土结构的计算原则，混凝土构件设计的基本理论和应用，几种主要的混凝土结构（梁板结构、水电站厂房及刚架结构，水工非杆件结构）的设计理论和应用。本书在编写过程中依据水利水电工程最新的各种标准和规范来编写，并尽量反映业已在工程中广泛采用的研究成果和最新进展，同时结合编写人员长期从事水利水电类、土木工程类钢筋混凝土结构课程教学的经验和体会，使本书的内容具有先进性和广泛的实用性。全书共十二章，各章均附有例题、习题和思考题。内容丰富，教学中可根据实际情况选学。

本书是高等学校水利水电工程专业本科的必修课教材，也可以作为土建类专业师生及设计、施工和研究单位的工程技术人员参考书。

本书由武汉大学土木建筑工程学院李传才主编，参加编写的有李传才、侯建国、何英明、卢亦焱、李大庆。编写分工为：绪论、第八章第五节、第十二章由李传才编写；第二章、第五章、第八章的第一~四节由侯建国编写；第一章、第三章由李大庆编写；第四章由李大庆、李传才编写；第六章、第七章由卢亦焱编写；第十章由卢亦焱、李传才编写；第九章、第十一章由何英明编写。侯建国对第三、四、十一、十二章进行了审校，何英明对第一、二、六、七、八、十章进行了审校。全书由李传才修改、统稿。

对于书中存在的缺点和错误，欢迎读者批评指正。

李传才

2000年10月

目 录

绪 论	1
一、混凝土结构的工作原理	1
二、混凝土结构的优点和缺点	2
三、混凝土结构的应用和发展	4
四、混凝土结构设计规范的发展	5
五、水工混凝土结构课程的性质、内容及特点	6
第一章 钢筋混凝土材料的力学性能	7
第一节 钢筋品种及力学性能	7
一、钢筋的品种及分类	7
二、钢筋的力学性能	9
三、钢筋的焊接性能	12
四、钢筋混凝土结构对钢筋性能的要求	13
第二节 混凝土及其力学性能	13
一、混凝土的构成	13
二、单向受力状态下的混凝土强度	13
三、复合受力状态下的混凝土强度	18
四、混凝土的变形性能	20
五、混凝土的弹性模量、泊松比和剪切模量	26
六、混凝土的重力密度	27
七、混凝土的其它特性	28
第三节 钢筋与混凝土的粘结性能	28
一、钢筋与混凝土间的粘结力	28
二、钢筋的锚固	29
三、钢筋的搭接	30
思考题和计算题	31
第二章 钢筋混凝土结构基本计算原则	33
第一节 钢筋混凝土结构设计理论发展简介	33
一、允许应力设计法	33

二、破损阶段设计法	33
三、半经验半概率的极限状态设计法	34
四、概率极限状态设计法	34
五、结构可靠度的有关概念	35
第二节 荷载的代表值与荷载分项系数	41
一、作用与荷载	41
二、荷载的分类及其代表值	41
三、荷载标准值	42
四、可变荷载组合值	42
五、可变荷载准永久值	42
六、荷载设计值与荷载分项系数	42
第三节 材料强度设计指标的取值	44
一、材料强度标准值与设计值的取值原则	44
二、混凝土强度设计指标的取值及其分项系数	44
三、钢筋强度设计指标的取值及其分项系数	46
第四节 概率极限状态设计法的实用设计表达式	46
一、结构的极限状态分类和设计要求	46
二、结构的设计状况与荷载效应组合	47
三、承载能力极限状态的设计表达式	48
四、正常使用极限状态的设计表达式	51
六、结构设计理论发展展望	52
思考题和计算题	54
第三章 钢筋混凝土轴心受力构件承载力计算	56
第一节 轴心受拉构件的承载力计算	56
一、轴心受拉构件的受力全过程	56
二、轴心受拉构件的承载力计算	57
三、轴心受拉构件的构造规定	58
第二节 轴心受压构件的承载力计算	58
一、轴心受压短柱的破坏特征及应力重分布过程	59
二、轴心受压短柱的承载力计算	61
三、轴心受压长柱的破坏特征及稳定系数	62
四、轴心受压长柱的承载力计算	64
五、受压柱的构造规定	66
第三节 螺旋式箍筋轴心受压柱的承载力计算	68
一、概述	68
二、受力及变形性能	69
三、承载力计算	69

四、应用的限制条件和构造规定	71
思考题和计算题	72
第四章 受弯Φ构件正截面承载力计算	74
第一节 受弯构件正截面受力全过程及破坏特征	75
一、适筋梁受力破坏全过程	75
二、钢筋混凝土梁正截面承载力的破坏特征	77
第二节 正截面受弯承载力计算假定和破坏的界限条件	79
一、基本假定	79
二、适筋破坏与超筋破坏的界限条件	80
三、适筋破坏与少筋破坏的界限条件	81
第三节 单筋矩形截面梁正截面受弯承载力计算	81
一、计算应力图形	81
二、基本计算公式	82
三、适用条件	83
四、设计计算方法	85
第四节 双筋矩形截面梁正截面受弯承载力计算	93
一、计算应力图形	93
二、基本计算公式	94
三、基本计算公式的适用条件	95
四、设计计算方法	95
第五节 T形截面梁正截面受弯承载力计算	102
一、概述	102
二、计算应力图形和基本计算公式	104
三、两类T形截面的判别	106
四、T形截面梁设计	106
五、T形截面梁承载力校核	107
六、T形截面梁承载力计算的另一种方法	108
第六节 受弯构件截面尺寸及配筋的构造规定	113
一、截面尺寸	113
二、钢筋的混凝土保护层厚度	113
三、梁内钢筋的直径和净间距	113
四、板内钢筋的直径和净间距	114
五、受力钢筋的强度等级	114
六、受弯构件中的构造钢筋	114
思考题和计算题	115
第五章 受弯构件斜截面承载力计算	121
第一节 斜截面的破坏形态与受剪机理	121

一、概述	121
二、斜截面受剪破坏的主要形态	123
三、斜截面的受剪机理	124
第二节 影响斜截面受剪承载力的主要因素	125
一、剪跨比	125
二、混凝土强度	126
三、配箍率及箍筋强度	127
四、纵筋的配筋率	127
第三节 斜截面受剪承载力计算	128
一、计算原则	128
二、斜截面受剪承载力的计算公式	128
三、计算截面的位置	131
四、计算公式的适用范围	131
五、按构造配箍的条件	133
六、斜截面受剪承载力计算中的几个问题	133
七、斜截面受剪承载力的计算方法与步骤	134
八、实心板的斜截面受剪承载力计算	135
第四节 斜截面受弯承载力	140
一、问题的提出	140
二、抵抗弯矩图的绘制	141
三、纵向钢筋的弯起	142
四、纵向钢筋的截断	145
五、抵抗弯矩图举例	147
第五节 配筋构造要求	148
一、纵筋的构造要求	148
二、弯起钢筋的构造要求	150
三、箍筋的构造要求	151
四、钢筋混凝土构件施工图	151
思考题和计算题	157
第六章 偏心受力构件承载力计算	160
第一节 偏心受压构件正截面破坏特征	161
一、大偏心受压破坏	161
二、小偏心受压破坏	162
三、大、小偏心受压构件的界限	163
第二节 偏心受压构件的纵向弯曲	163
一、概述	163
二、偏心距增大系数 η	164

第三节	偏心受压构件正截面承载力计算	166
一、	矩形截面大偏心受压构件正截面承载力计算	166
二、	矩形截面小偏心受压构件正截面承载力计算	170
三、	偏心受压构件的构造要求	175
第四节	双向偏心受压构件正截面承载力计算	184
第五节	偏心受拉构件正截面承载力计算	186
一、	小偏心受拉构件正截面承载力计算	186
二、	大偏心受拉构件正截面承载力计算	187
第六节	偏心受力构件斜截面承载力计算	190
一、	偏心受压构件斜截面承载力计算	190
二、	偏心受拉构件斜截面承载力计算	192
	思考题和计算题	194
第七章	受扭构件承载力计算	196
第一节	概 述	196
第二节	纯扭构件的开裂扭矩及承载力计算	197
一、	矩形截面开裂扭矩	197
二、	受扭构件受力特征和破坏形态	198
三、	抗扭纵筋与箍筋的配筋强度比	199
四、	受扭构件计算模型及理论计算公式	200
五、	受扭构件承载力计算公式	202
第三节	弯剪扭构件承载力计算	206
一、	剪扭构件承载力计算	206
二、	弯扭构件承载力计算	208
三、	弯剪扭构件承载力计算	208
四、	计算公式适用条件	209
第四节	受扭构件的配筋构造要求	215
一、	受扭箍筋的构造要求	215
二、	受扭纵筋的构造要求	215
	思考题和计算题	215
第八章	钢筋混凝土结构正常使用极限状态的验算	217
第一节	概 述	217
一、	正常使用极限状态的验算要求	217
二、	变形和裂缝宽度的限值及混凝土拉应力限制系数的取值	218
三、	耐久性要求	218
第二节	混凝土结构的耐久性问题	219
一、	影响混凝土结构耐久性的主要因素及其对策	219
二、	保证混凝土结构耐久性的设计规定	221

第三节	受弯构件变形验算	223
一、	截面的弯矩 - 曲率关系和刚度	223
二、	短期刚度 B_s	225
三、	长期刚度 B_l	227
四、	受弯构件的挠度验算	228
第四节	钢筋混凝土构件抗裂度验算	230
一、	轴心受拉构件的抗裂度验算	230
二、	受弯构件的抗裂度验算	231
三、	偏心受压构件的抗裂度验算	233
四、	偏心受拉构件的抗裂度验算	234
第五节	钢筋混凝土构件裂缝开展宽度的验算	236
一、	裂缝产生的原因及控制裂缝开展的措施	236
二、	裂缝开展宽度计算理论简介	238
三、	平均裂缝开展宽度	240
四、	最大裂缝开展宽度	244
五、	裂缝开展宽度验算	248
六、	计算例题	249
	思考题和计算题	251
第九章	预应力混凝土构件计算	253
第一节	概 述	253
一、	预应力混凝土的基本原理	253
二、	预应力混凝土构件分类	254
三、	预应力混凝土的特点	254
四、	预应力混凝土构件的计算内容	255
五、	预应力混凝土的应用	255
第二节	预应力施工方法和预应力混凝土的材料	257
一、	施加预应力的方法	257
二、	预应力混凝土的材料	258
三、	锚具和夹具	260
第三节	张拉控制应力和预应力损失	263
一、	张拉控制应力	263
二、	预应力损失	264
三、	预应力损失的组合	270
第四节	预应力混凝土轴心受拉构件的计算	270
一、	轴心受拉构件各阶段的应力分析	270
二、	轴心受拉构件使用阶段的计算	276
三、	轴心受拉构件施工阶段的验算	280

第五节 预应力混凝土受弯构件计算	286
一、受弯构件的应力分析	286
二、受弯构件使用阶段的计算	292
三、受弯构件施工阶段验算	304
第六节 预应力混凝土构件的构造要求	314
一、一般规定	314
二、先张法构件的构造要求	316
三、后张法构件的构造要求	316
第七节 部分预应力混凝土及无粘结预应力混凝土的概念	318
一、部分预应力混凝土结构	318
二、无粘结预应力混凝土结构	321
思考题和计算题	322
第十章 钢筋混凝土梁板结构	325
第一节 概 述	325
第二节 单向板梁板结构按弹性方法的计算	326
一、结构平面布置	326
二、计算简图	327
三、按弹性方法计算板和梁内力	330
第三节 单向板梁板结构按塑性方法的计算	333
一、钢筋混凝土受弯构件的塑性铰	333
二、塑性内力重分布	334
三、弯矩调幅法确定连续梁的内力	335
第四节 单向板梁板结构的截面设计和构造要求	339
一、连续板的截面设计与构造要求	339
二、连续梁的截面设计与构造要求	341
第五节 双向板梁板结构的设计	343
一、双向板试验结果及受力特点	343
二、双向板的内力计算	344
三、双向连续板中支承梁的设计	345
四、双向板的截面设计和构造要求	346
第六节 钢筋混凝土梁板结构设计实例	348
一、设计资料	348
二、楼面梁格布置和构件截面尺寸	348
三、板的设计	349
四、次梁设计	350
五、主梁设计	354
思考题和计算题	361

第十一章 水电站厂房及刚架结构	363
第一节 概 述	363
一、水电站厂房的类型	363
二、水电站厂房的组成	364
第二节 厂房尺寸及上部结构布置	365
一、主厂房主要尺寸的确定	365
二、主厂房结构布置	367
三、主厂房荷载传递路径	369
第三节 厂房结构设计的一般规定	369
一、基本要求	369
二、结构重要性系数和设计状况系数	369
三、荷载效应组合及荷载分项系数	370
四、混凝土强度等级	371
五、结构分析方法	371
第四节 厂房楼板的计算与构造	372
一、楼面荷载	372
二、楼板的内力计算	373
三、楼板配筋构造	374
第五节 厂房刚架计算与构造	377
一、计算单元和计算简图	377
二、作用在刚架上的荷载	379
三、刚架内力计算及内力组合	387
四、截面设计和构造	389
第六节 立柱独立牛腿计算与构造	391
一、牛腿的受力特征和破坏形态	391
二、牛腿的设计	393
第七节 柱下独立基础	396
一、柱下独立基础的型式和构造要求	396
二、柱下独立基础设计	397
思考题和计算题	404
第十二章 水工非杆件结构	405
第一节 水工非杆件结构的设计原则	405
一、水工非杆件结构的内力和应力计算	405
二、水工非杆件结构的承载能力计算	406
三、水工非杆件结构的配筋构造	410
四、水工非杆件结构的裂缝控制	410
第二节 深受弯构件的计算	411

一、深受弯构件的应力和内力计算	411
二、深受弯构件的工作特性	411
三、深受弯构件的承载力计算	412
四、深受弯构件的正常使用极限状态验算	415
五、深受弯构件的配筋构造	416
第三节 混凝土坝内廊道及孔口结构	418
一、作用在孔口和廊道上的荷载	418
二、坝内孔口和廊道的应力计算	419
三、孔口和廊道的配筋	423
第四节 混凝土坝内埋管和坝后背管	426
一、坝内埋管的设计	426
二、坝后背管的设计	431
第五节 机墩蜗壳和尾水管结构	434
一、圆筒式机墩设计	435
二、矮机墩设计	441
三、金属蜗壳外围混凝土结构设计	442
四、混凝土蜗壳设计	445
五、尾水管结构计算	447
第六节 水工弧形闸门支承结构	451
一、概述	451
二、闸墩及支座的型式和特征	452
三、弧门闸墩及支座的受力特征和破坏形态	453
四、闸墩与弧门支座的裂缝控制和承载力计算	455
五、构造要求	458
六、弧门支承结构设计实例	458
第七节 钢筋混凝土有限元法在水工非杆件结构中的应用	462
一、坝后背管的有限元分析 ^[63]	463
二、坝内埋管的有限元分析 ^[74]	465
三、水电站蜗壳的有限元分析 ^[75]	465
四、预应力闸墩及锚块的有限元分析 ^[76]	466
附录 1 材料的强度和弹性模量	472
附录 2 钢筋的计算截面面积表	476
附录 3 一般构造规定	478
附录 4 正常使用验算的有关限值	480
附录 5 等跨等截面连续梁在常用荷载作用下的内力系数表	482
附录 6 双向板内力和挠度系数表	492
参考文献	498

绪 论

一、混凝土结构的工作原理

混凝土结构是土木工程中按材料来区分的一种结构，它的材料组成是混凝土和钢筋等增强材料。它包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构和预应力混凝土结构。事实上，混凝土结构的范围还可以更广泛一些。19世纪中叶以后，人们开始在素混凝土中配置抗拉强度高的钢筋，以获得加强效果。如果用“加强”的概念来定义“钢筋混凝土结构”(Reinforced Concrete Structure)，则钢纤维混凝土结构(Fibre Reinforced Concrete)、钢管混凝土结构、钢-混凝土组合结构等，均可以属于钢筋混凝土结构的范畴。随着混凝土结构技术的进一步发展，混凝土结构的大家庭将越来越兴旺。

在现代土木工程结构中，混凝土结构比比皆是，没有人不知道混凝土结构。但是作为工程结构技术人员，对混凝土结构的认识不能仅停留在它是由水泥、砂、石和水组成的人工石，也不能只停留在“混凝土中埋置了钢筋就成了钢筋混凝土结构”，而应从本质上即力学概念上去认识它，去了解它的基本工作原理。

那么，钢筋混凝土结构最基本的工作原理是什么呢？毫无疑问，钢筋混凝土结构是由混凝土和钢筋两种不同的材料组成的，这是两种力学特性不同的材料。混凝土是由水泥、砂、石用水拌和后凝固而成的人工石，它的抗压强度很高，但抗拉强度却很低，它是一种非匀质、非弹性、非线性的建筑材料。钢筋则是一种匀质的线性弹性材料，它的抗拉强度和抗压强度均很高。这两种材料的有机结合，可大大提高构件的承载能力。如图0-1(a)所示的简支素混凝土梁，当荷载 P 较小时，截面上的应力分布符合材料力学的平截面假定。当荷载增至下边缘的拉应力大于混凝土的抗拉极限强度时，混凝土即开裂，并很快从下到上裂穿而瞬即破坏。这样的素混凝土梁，承载力是很低的，而且受压区的混凝土还远未达到其抗压强度，因此材料的利用是很不充分的。如何才能提高它的承载能力呢？人们自然想到在受拉区埋置抗拉强度很高的钢筋来加强它(如图0-1(b)所示)。当下边缘混凝土开裂时，即可由受拉钢筋承担原来由拉区混凝土承担的那一部分拉应力。随着荷载 P 的增大，受拉区钢筋的拉应力和受压区混凝土的压应力均不断增大，直到钢筋屈服并受压混凝土压碎时，梁才达到极限承载力。实验证明，当截面尺寸和混凝土等级相同时，配置了适量钢筋的梁比之素混凝土梁，其承载能力可提高数倍乃至十多倍。

不了解钢筋混凝土受力本质的非工程结构技术人员，常常以为埋置了钢筋的梁，就一定能提高其承载力，其实不然。试想，如果把钢筋埋在梁上方的受压区，则梁的承载

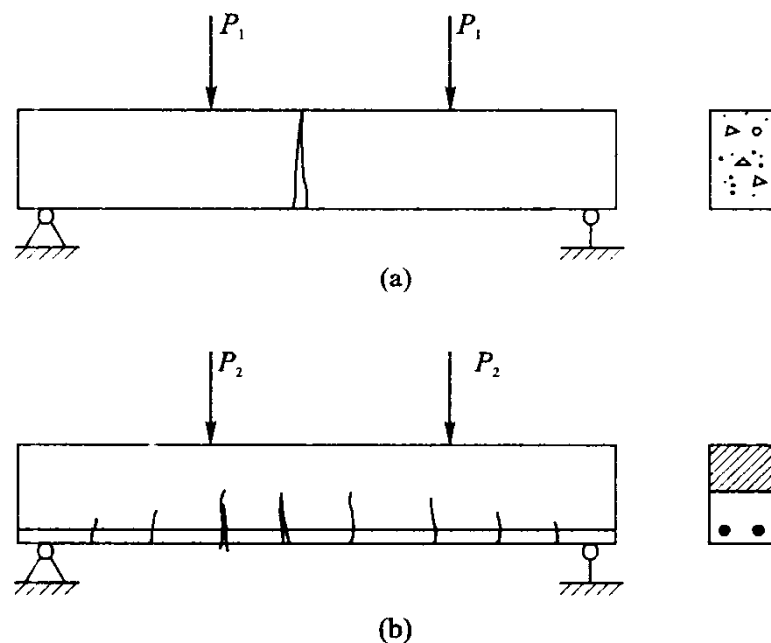


图 0-1 钢筋混凝土梁的工作原理
(a)素混凝土梁；(b)钢筋混凝土梁

力一点都未提高，钢筋则白白浪费。

除了钢筋的布置位置要正确外，承载力得以提高的另一重要条件是钢筋和混凝土之间必须保证共同工作。由于钢筋和混凝土之间良好粘结，使两者结合为整体，而且这种整体还不致由于温度变化而破坏（因为钢筋和混凝土的线膨胀系数相近），同时钢筋周围有足够的混凝土包裹，所以两者的共同工作是可以得到保证的。

由上可知，正确理解钢筋混凝土结构的工作原理，不外乎如下三点：

- (1) 钢筋混凝土由混凝土和钢筋两种材料组成，这两种材料的力学特性是不相同的；
- (2) 两种材料必须“各在其所”，才能各显其能，各司其职。即钢筋置于构件的受拉区，混凝土则承受压力，从而充分发挥各自的力学特性，提高构件的承载能力；
- (3) 必须保证两种材料的共同工作。

理解了这种工作原理，也就不难理解钢筋混凝土的英文名称“Rienforced Concrete”（缩写为 RC）的科学性，并且也就不难理解为什么钢纤维混凝土、钢管混凝土乃至 20 世纪 50 年代我国曾使用过的竹筋混凝土均可归属于“钢筋混凝土”的范畴，均可广义地称之为“钢筋混凝土”结构。

二、混凝土结构的优点和缺点

混凝土结构之所以得到广泛的应用，是因为它具有如下几方面的优点。

(1) 整体性。这主要是指现浇混凝土结构，如整体式梁板结构，框架结构，大体积混凝土结构等，它们均具有良好的整体性。水工混凝土结构绝大多数为现浇结构。现浇整体式混凝土结构有利于防震、防冲击、防爆炸、结构可靠性大。

(2) 可模性。混凝土可按设计要求浇筑成各种不同尺寸和形状的结构，尤其适合建造外型复杂的水利水电工程。

(3) 耐久性。混凝土和钢筋材料本身均具有很好的耐久性，钢筋又受到混凝土的保

护而不易锈蚀，混凝土的强度还可以随时间而增长，所以在正常使用下，混凝土结构具有较好的耐久性。

(4) 耐火性。混凝土热传导性差，钢筋又埋在混凝土内部，在火灾中钢材不至于在短时间内软化，即使长时间燃烧，也仅烧坏结构表面，不易发生整体破坏，所以其耐火性比钢结构和木结构要好。

(5) 经济性。混凝土结构的材料，除水泥和钢材外，砂、石等材料均可就地取材，而砂、石在混凝土结构中占的比例很大。在我国，水泥的产地分布很广，也不需要长途运输。水利水电工程有相当一部分在山地河流中建造（重力坝、拱坝等），另一些则在平原江湖中建造，砂和石料均可就地取材。如前所述，钢筋混凝土结构中的两种材料有机结合，能充分发挥各自的优势，结构组成非常合理。混凝土工程施工时虽然需预先立好模板，但在普遍应用钢模板的今天，模板的制作和架立均不困难，而且可重复利用，降低造价。因此，混凝土结构相对于钢结构而言，总体造价较低。

混凝土结构的主要缺点有：

(1) 自重大。在同样承载力的条件下，混凝土结构所需要的材料自重比钢结构大。由于自重大使截面的抗力要花费相当大的部分用于抵抗其自身的重量，这给建造大跨度结构和超高层结构造成了困难。

(2) 抗裂性差。普通钢筋混凝土结构在正常使用的情况下往往出现裂缝。这一缺点对水工混凝土结构尤为不利。裂缝的存在降低了混凝土抗渗抗冻的能力。当水和有害气体侵入后又会引起钢筋生锈，影响正常使用和耐久性。一些水工结构的裂缝还会引起水的渗漏，影响正常使用的功能。民用建筑和公共建筑的裂缝还会造成使用者心理上的不安全感。

(3) 施工较复杂。混凝土结构施工需经过制模、立模、搅拌、浇筑、振捣、养护、凝固等多个工序。工期较长，施工技术复杂，施工要求严格。一旦出现质量事故，结构即拆除报废，不像钢结构和砌体结构，部分材料尚可重复利用。混凝土结构的施工还受气候和环境条件的限制。大型水利水电工程还要求较大的砂、石料场和混凝土搅拌场。水工大体积混凝土还要有温控措施，否则会因温度应力大而引起质量事故。即使是装配式结构，预制构件在现场装配时也非易事，需填缝、找平，接头构造也较复杂并浇二期混凝土。预应力混凝土结构的设计和施工则更为复杂，要求具有更高水平的专门的施工队伍。

对混凝土结构的优点和缺点应辩证地对待。结构工程的建造是选择混凝土结构，还是选择钢结构或其他结构，要按照具体的条件来确定。在水利水电工程建设中，由于其工程结构的特殊功能要求，混凝土结构的应用更为大量，但一些小型的挡水工程也常采用砌体结构。随着我国钢产量的增长以及钢材市场的变化，建筑工程中钢结构的应用也愈来愈广泛，特别是工业厂房（如火力发电厂）和高层、高耸建筑。另一方面，混凝土的缺点也可以随着结构工程技术的进步而得到克服和改善。例如，轻质高强混凝土的采用就可以减少结构的自重；预应力技术和高强材料的采用既可减少截面尺寸，又提高了抗裂性，从而使混凝土结构也可用于大跨度结构和高层高耸结构。钢纤维混凝土也可以提高抗裂性。商品混凝土、泵送混凝土、滑模施工以及各种混凝土添加剂等施工技术的推广应用，都使混凝土结构工程的施工质量和施工进度大大提高。因此上述提及的混凝

土的缺点也不是一成不变的。

三、混凝土结构的应用和发展

由于混凝土结构的上述优点，无论是在国内还是国外，无论是在城镇还是辽阔的农村，混凝土结构比比皆是。现代化建设离不开混凝土结构。混凝土结构在土木工程中的应用主要有以下几个方面：

(1) 建筑工程中的多层和高层房屋以及公共建筑，工业厂房和仓库，烟囱、冷却塔、电视塔等特种结构；

(2) 水利水电工程中的挡水和泄水建筑物，水电站厂房，输水隧洞、压力管道、调压塔、机墩、蜗壳、尾水管、船闸、水闸、渡槽、涵洞、挡土墙等；

(3) 港口和海洋工程中的码头、船坞、采油平台等；

(4) 市政工程中的水池、水塔、立交桥、高架桥、地铁等；

(5) 交通工程中的公路、铁路、桥梁、隧道、车站等。

混凝土结构的发展，至今也不过 160 多年的历史。土木工程最早的还是用木结构和砌体结构，后来又是钢结构，混凝土结构则是后起之秀。混凝土结构的发展可追溯到 19 世纪 20 年代。1824 年发明了波特兰水泥，这是由于用它做成的人工石呈青灰色，与英国波特兰岛上的岩石相似而得名。水泥的出现使土木工程技术的发展进入了一个新的时期。钢筋混凝土是在水泥发明十多年后出现的。1850 年法国人 Lombot 做出了第一只钢筋混凝土小船(这种配有钢筋网的水泥船 20 世纪 60~70 年代在我国南方水乡曾大量制造使用)，4 年后英国人 Wilkinson 做出了第一个钢筋混凝土楼板，并取得了专利。1861 年，巴黎的花匠 Joreph Monier 做出了钢筋混凝土花盆，并于 1867 年获得专利。此后，Monier 又制造了钢筋混凝土梁、板、管等混凝土构件。在早期混凝土结构的发展中，Monier 有其突出的贡献，他的发明通常被称为“蒙氏系列”。

伴随着混凝土结构制造技术的发展，它的设计理论也得以逐步完善。早期的混凝土构件的设计离不开古典的弹性理论及其允许应力法。这种方法采用比钢筋的屈服强度和混凝土的抗压强度的实测值低很多的应力作为允许应力，而截面的内力和应力按材料力学计算。这种设计理论与实际情况有很大出入，其安全可靠也无法准确揭示。20 世纪 40 年代时，前苏联提出了一个新的计算方法，即破坏阶段法。这一方法考虑了材料的塑性以及截面开裂后引起的应力重分布。截面破坏时的承载力由钢筋屈服强度的平均值和混凝土抗压强度的平均值来确定。使用荷载作用下的内力仍按材料力学和结构力学计算。结构的安全由单一的安全系数 K 来保证。 K 的取值比较大，而且带有很大的经验性。

20 世纪 50 年代，前苏联还提出了按极限状态法设计。这一方法明确提出了极限状态的概念，认为达到极限状态时，结构即失去抵抗外力的能力，并失去正常使用的功能。截面的内力虽然按弹性理论计算，但荷载包含了统计分析的内容，材料强度通过统计分析取分位值。结构的可靠性由几个计算系数来保证，而不是一个单一的安全系数。这一方法概念明确，考虑问题比较细，理论上也比较完善，到 70 年代已被各国普遍采用。

极限状态法从 50 年代至今已走过了几个不同的发展阶段，开始时是多系数表达的极限状态法，后来又有我国的多系数分析单一安全系数表示的极限状态法，这些方法虽

然在一部分荷载和材料强度的取值方面应用了概率理论，考虑了它们的变异性，但是设计表达式中的设计参数或安全系数都是主要由经验确定，并看成不变的定值，结构的可靠性以安全系数来衡量，属于“定值设计法”。而对于可靠性的度——可靠性的概率均未给出量值，这是当时的极限状态法的局限性。70年代后，随着结构可靠度理论的发展，极限状态又进入了新的“近似概率法”阶段，这一方法以概率理论为基础，以失效概率或可靠概率来度量结构的可靠性，并把可靠概率（即可靠度）隐含在几个分项系数之中，从而使计算理论更加完善。

除了设计理论的巨大进展外，混凝土结构的其他基本理论也以很快的速度发展。例如在混凝土结构材料的研究方面，有高强混凝土、轻质混凝土、纤维混凝土、聚合物混凝土、微膨胀混凝土、水下不分散混凝土、混凝土粘钢补强材料、混凝土各种添加剂等基本理论和应用的研究；在混凝土强度理论的研究方面，有单轴和多轴应力下的本构关系的研究、混凝土断裂机理的研究、混凝土和钢筋粘结机理的研究等；在预应力混凝土设计理论方面，有全部预应力混凝土和部分预应力混凝土理论的研究；在混凝土结构计算力学的研究方面，随着计算机和有限元方法的发展，钢筋混凝土非线性有限元的分析方法也从20世纪60年代开始有了很大的发展，特别是水工非杆件结构的分析方面，在我国得到了广泛的应用；在混凝土结构施工技术的研究方面，定型化、标准化的装配式结构，商品混凝土，泵送混凝土，滑模施工、碾压混凝土施工等技术的研究和应用都有很大的进展。

四、混凝土结构设计规范的发展

随着工程建设经验的积累和混凝土结构理论研究和技术的进步，我国混凝土结构设计规范也越来越完善。1949年以前，我国混凝土结构设计规范几乎是一片空白，50年代初主要是照搬原苏联的设计规范，如1955年制定的《钢筋混凝土结构设计暂行规范》（规范6-55）采用的即是当时苏联规范中的破坏阶段法。50年代末开始着手编制我国自己的规范。1966年颁布的《钢筋混凝土结构设计规范》（GBJ21-66）则采用了多系数表达的极限状态法，这在当时是比较先进的。后来于1974年又颁布了新的《钢筋混凝土结构设计规范》（TJ10-74）；与此同时，当时的水利电力部也着手编制并于1979年颁布了《水工钢筋混凝土结构设计规范》（SDJ20-78）。这两本规范均采用了多系数分析单一安全系数表达的极限状态法。GBJ21-66和TJ10-74规范的颁布实施标志着我国混凝土结构设计规范已步入了从无到有、由低向高发展的阶段。从20世纪80年代开始，我国在开展大量的专题研究的基础上，吸收国外的先进理论和经验，全面修订工程结构（主要是建筑工程）的设计规范，从而使我国的混凝土结构规范进入了一个更高的阶段。1984年颁布了《建筑结构设计统一标准》（GBJ68-84），1990年颁布了《混凝土结构设计规范》（GBJ10-89）。与此同时，又颁布了一系列与GBJ68-84配套的建筑工程设计规范。1992年又颁布了第一层次的规范《工程结构可靠度设计统一标准》（GB50153-92）。90年代以后，由中国工程建设标准化协会混凝土结构标准技术委员会主持下继续进行第五批规范课题研究，并着手新一轮的规范修订工作。不久以后，我国最具权威的新的混凝土结构设计规范又将问世。