

MCE
08

土木工程专业研究生系列教材

高等混凝土 结构理论

江见鲸 李杰 金伟良 主编

Master of Civil Engineering

 中国建筑工业出版社
CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

土木工程专业研究生系列教材

高等混凝土结构理论

江见鲸 李 杰 金伟良 主编



中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高等混凝土结构理论/江见鲸, 李杰, 金伟良主编.
北京: 中国建筑工业出版社, 2006
(土木工程专业研究生系列教材)
ISBN 978-7-112-08572-9

I. 高... II. ①江...②李...③金... III. 混
凝土结构-研究生-教学参考资料 IV. TU37

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 120816 号

土木工程专业研究生系列教材
高等混凝土结构理论
江见鲸 李 杰 金伟良 主编*

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
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
北京市安泰印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 22½ 字数: 545 千字
2007 年 1 月第一版 2007 年 1 月第一次印刷
印数: 1—3000 册 定价: 32.00 元

ISBN 978-7-112-08572-9
(15236)

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)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

本书全面系统地介绍了混凝土结构的设计计算理论、科研成果和工程应用前景, 主要包括混凝土材料、混凝土受力本构关系、钢筋与混凝土的粘结、建筑结构设计方法、受弯与压弯构件分析原理、剪切构件分析原理、受扭构件分析原理、混凝土构件的裂缝与变形、钢筋混凝土结构的抗震性能、钢筋混凝土结构在冲击荷载下的性能、混凝土杆系结构非线性分析、混凝土结构的耐久性。本书对于混凝土结构的最新发展作了较详细的说明, 如数值分析中的有限元方法, 混凝土的耐久性等。

本书可作为土建类高等院校的研究生教材, 也可作为土建专业大专院校师生的教学参考书, 同时也可供从事土建工程设计和施工的广大技术人员阅读参考。

* * *

责任编辑: 王 跃 李 明

责任设计: 董建平

责任校对: 邵鸣军 王金珠

前 言

混凝土结构在国内外均有广泛应用，在中国的应用尤为普遍。混凝土结构课程是土木类专业的必修主干课之一。由于混凝土材料本构关系复杂，结构形式多样，计算理论还在不断发展，而本科教学中的有关混凝土结构课程，着重点在于正确理解和应用规范的算法。本书作为研究生教材，在深度和广度上均有所扩展。本书在编写过程中注意突出以下几点：

1. 着重阐述混凝土的基本原理而不受某种特定规范的约束。
2. 一方面注意在科学试验的基础上说明计算模型与计算方法，同时对混凝土的近代数值模拟（或仿真分析）作了详细的介绍，特别列入本构关系及有限元分析的章节。
3. 对本学科的最新发展给予了特别关注。例如混凝土结构的抗震、抗爆性，耐久性设计等，均列专章予以介绍。

本书的编写人员均在有关高校给研究生讲授高等混凝土结构课程，有丰富的教学经验和科研经历，本书是在各校自编教材或讲义的基础上改编而成。具体编写的分工为：清华大学江见鲸、阎培渝、陆新征编写第 1、2、5、7、8 章；同济大学李杰、顾祥林、赵鸣、苏小卒、屈文俊编写第 3、4、10、11、12、13 章，浙江大学金伟良、张爱暉编写 6、9 章。最后由江见鲸、李杰分别统稿。

本书难免有许多不足之处，敬请读者批评指正。

编者 2006 年 4 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 混凝土结构的特点	1
1.2 混凝土结构的发展简况	2
1.3 混凝土结构的发展展望	4
参考文献	11
第 2 章 混凝土材料	12
2.1 混凝土的组成与配合比设计	12
2.2 新拌及早龄期混凝土的性能	17
2.3 混凝土的力学性能	21
2.4 混凝土的变形	30
参考文献	37
第 3 章 混凝土受力本构关系	38
3.1 概述	38
3.2 经验物理模型——混凝土单轴受力本构关系	39
3.3 理论物理模型——混凝土多轴受力本构关系	46
3.4 随机物理模型——混凝土随机损伤本构关系	60
参考文献	62
第 4 章 钢筋与混凝土的粘结	64
4.1 钢筋与混凝土的粘结机理	64
4.2 粘结应力-滑移本构关系	72
4.3 反复荷载下的粘结-滑移性能	76
参考文献	80
第 5 章 建筑结构设计方法	83
5.1 建筑结构设计理论的发展	83
5.2 结构极限状态的基本概念	86
5.3 结构可靠度的基本原理与计算方法	88
5.4 近似概率法在设计规范中的应用	104
参考文献	123
第 6 章 受弯与压弯构件分析原理	124
6.1 受弯与压弯构件分析基本原理	124
6.2 型钢混凝土受弯与压弯构件	131
6.3 混凝土叠合受弯构件	139
6.4 FRP 受弯构件	143
参考文献	146
第 7 章 剪切构件分析原理	148

7.1	无腹筋梁的抗剪性能	148
7.2	有腹筋梁的抗剪性能	151
7.3	斜截面抗剪承载力计算公式	153
7.4	一些国外规范的抗剪承载力计算公式	158
7.5	钢筋混凝土梁抗剪计算模型和机理分析	164
7.6	外贴 FRP 片材抗剪加固承载力计算公式	176
	参考文献	183
第 8 章	受扭构件分析原理	185
8.1	纯受扭构件承载力计算	185
8.2	弯剪扭构件的承载力计算	194
8.3	一些国外规范的计算公式	206
	参考文献	210
第 9 章	混凝土构件的裂缝与变形	211
9.1	概论	211
9.2	混凝土构件裂缝宽度计算	213
9.3	混凝土受弯构件的刚度与变形	228
9.4	混凝土受剪构件的刚度与变形	240
9.5	混凝土受扭构件的刚度与变形	244
	参考文献	249
第 10 章	钢筋混凝土结构的抗震性能	252
10.1	地震对钢筋混凝土结构的危害	252
10.2	钢筋混凝土结构构件的抗震性能	254
10.3	基于承载力的结构构件抗震设计	264
10.4	钢筋混凝土结构抗震设计中的延性分析	270
	参考文献	281
第 11 章	钢筋混凝土结构在冲击荷载下的性能	283
11.1	引言	283
11.2	冲击荷载	283
11.3	钢筋混凝土动态力学性能	290
11.4	混凝土的动态本构关系	295
11.5	冲击荷载、快速荷载作用下的粘结性能	296
	参考文献	297
第 12 章	混凝土杆系结构非线性分析	299
12.1	混凝土杆单元模型	299
12.2	结构非线性静力分析	308
12.3	结构非线性动力分析	312
	参考文献	320
第 13 章	混凝土结构的耐久性	321
13.1	混凝土结构耐久失效(劣化)现象	321
13.2	混凝土结构劣化的机理及影响因素	322
13.3	混凝土结构的碳化预测	327
13.4	混凝土结构中钢筋的锈蚀	330

13.5 碱-骨料反应.....	334
13.6 混凝土的冻融破坏	336
13.7 混凝土结构的耐久性设计	338
参考文献	351

第 1 章 绪 论

1.1 混凝土结构的特点

混凝土结构包括素混凝土结构 (Plain concrete structure)、钢筋混凝土结构 (Reinforced concrete structure)、预应力混凝土结构 (Prestressed concrete structure) 和其他形式的加筋混凝土结构。素混凝土结构常用于路面和一些非承重结构; 预应力混凝土结构是配置了预应力钢筋的混凝土结构。在大多数情况下, 混凝土结构是由钢筋和混凝土组成的钢筋混凝土结构。钢筋混凝土结构由钢筋与混凝土两种材料组成, 这两种材料结合可以取长补短, 是非常理想的材料组合方式。

混凝土的抗压强度较高而抗拉强度很低; 钢材抗拉、抗压强度均很高, 但做成细长条的钢筋后, 容易压屈, 几乎不能形成实际承重结构, 两者相互组合, 可以充分发挥两者的强度。钢材在一般环境中易于锈蚀, 维护代价很大, 但钢筋置于混凝土中, 处于碱性环境, 则不易受腐蚀, 使耐久性大大提高, 几乎不需要经常维护。

此外, 钢材的耐火性差, 钢筋放在混凝土中则可提高其耐火性。

钢筋与混凝土能够很好的共同工作, 还基于钢筋 (尤其是变形钢筋) 与混凝土之间有很好的粘结力, 在外荷载作用下能协调变形、共同工作。此外, 钢材与混凝土的温度线膨胀系数很接近, 钢约为 1.2×10^{-5} , 混凝土为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5}$, 当温度变化时, 两者不会发生过大的相对变形而使两者间的粘结破坏。

两种材料结合形成一整体结构, 可以有效地利用两种材料的强度, 这可以用一组对比实验来说明。用 C20 混凝土制作两根梁, 截面均为 $150\text{mm} \times 300\text{mm}$, 长 3000mm , 一根为素混凝土梁, 一根梁的下部放置两根 $\Phi 16$ 钢筋 (HRB 335 级钢筋, 直径 16mm)。置梁于间距 2500mm 的支座上做承载试验, 在跨中逐步施加集中荷载。素混凝土梁在跨中加载接近 10kN 时, 梁底产生一条裂缝, 并迅速向上发展, 导致梁断裂破坏, 最大承载力为 10.1kN 。而配有钢筋的梁, 当荷载比 10kN 多一点时, 梁底也产生裂缝, 但裂缝微小; 当荷载增加时, 裂缝也向上发展, 但较慢, 梁仍可继续承载; 直到荷载加到 55.7kN 时, 梁底钢筋达到流限 (屈服强度); 稍后, 裂缝上方的受压区混凝土被压碎, 梁才告破坏。可见, 配有钢筋的梁, 承载力大大提高, 而且破坏也不像素混凝土那样突然。

钢筋混凝土结构在实际结构中有着广泛的应用, 这是因为它有很多优点。其主要优点有:

(1) 强度高。和砖、木结构相比, 其强度高。在一定条件下可以用来代替钢结构构件, 达到节约钢材、降低造价的目的。

(2) 耐久性好。在一般环境条件下, 钢筋受混凝土保护不易生锈, 而混凝土的强度随着时间的增长还会有所增长, 所以耐久性好。

(3) 耐火性好。混凝土是热的不良导体，遭遇火灾时，钢筋因为有混凝土包裹，不致很快升温软化而达到失去承载力的程度，因而其耐火性比钢结构和木结构要好。

(4) 可模性好。混凝土可以根据设计需要浇筑成各种形状和尺寸的结构，因此适用于形状复杂的结构，如箱形结构、空间薄壳等。

(5) 整体性好。整体浇筑的钢筋混凝土结构整体性好，对抗震、抗爆结构有利。

(6) 易于就地取材。混凝土原材料中有很大比例是石子和砂子，产地广泛，便于就地取材。

但是，钢筋混凝土结构也有一些缺点，主要有：

(1) 自重。这对于建造大跨结构和抗震结构是不利的。

(2) 抗裂性差，开裂过早。普通混凝土结构在正常使用荷载下往往带裂缝工作，这对耐久性不利，并且限制了在防渗、防漏要求严格的容器、管道结构中的应用。

(3) 施工比较复杂，工序多，工期长，受环境影响大。如雨季施工，冬期施工，干燥高温天气下施工等，必须采取特别措施以确保工程质量。

(4) 混凝土一旦局部破坏，补强修复工作比较困难。

我们在应用混凝土结构时必须充分发挥其优点，避免其缺点，并努力发展新的技术，使其缺点得以克服或改进。

1.2 混凝土结构的发展简况

1.2.1 混凝土发展的几个阶段

人造硅酸盐水泥的发明距今仅 180 多年，钢筋混凝土结构的出现也仅 160 年左右，与砖石结构、钢结构、木结构相比，历史并不长，但发展非常迅速，至今为止几乎在所有的土建工程建设领域均有广泛的应用。混凝土结构的发展，大体上可以分为三个阶段。

第一阶段是从钢筋混凝土结构发明至 20 世纪初。这一阶段，所采用的钢筋和混凝土的强度都比较低，主要用来建造中小跨度的楼板、梁、拱和基础等构件。计算理论则套用弹性理论，设计则采用容许应力法。

第二阶段是从 20 世纪初到第二次世界大战前后。这一阶段的重要成就就是预应力混凝土的发明和应用，混凝土和钢筋强度有所提高，钢筋混凝土被用来建造大跨空间结构。在计算理论上，已开始考虑材料的塑性，如板的塑性铰线理论。钢筋混凝土截面已经开始按破损阶段计算破坏承载力。

第三阶段是二战以后直到现在。这一阶段的主要成就是：高强混凝土和高强钢筋的出现及其广泛应用；预制混凝土构件，采用泵送商品混凝土生产混凝土结构；许多大型结构工程的兴建，如超高层建筑、大跨桥梁、特长的跨海隧道、高耸结构等；计算理论上已经过渡到充分考虑混凝土和钢筋塑性的极限状态设计理论；在设计方法上已过渡到以概率论为基础的多系数表达的设计公式。

钢筋混凝土的发展非常迅速，应用极其广泛，成就非常突出。下面仅举一些例子加以说明。

1.2.2 房建工程

在房屋建筑中，工厂、住宅、办公楼等单层、多层建筑广泛采用混凝土结构。在 7 层

以下的多层房屋中大多采用砌体结构为墙体，作为竖向承重构件，但楼板几乎全都采用了预制混凝土板或现浇混凝土楼盖。高层建筑是城市发展的产物。闻名世界的混凝土建筑——美国芝加哥的威克·德奈夫大楼，于1990年建成，65层，高295m；中国广东的国际大厦，总建筑面积约为18万m²，主体为63层，高200.18m；澳大利亚的里奥托中心，1986年建成，高243m；德国在莱茵河畔建造的密思埃姆大厦，70层，高256m……；以上这些都是混凝土结构，在城市高层建筑的发展中起到了重要作用。

在单跨度建筑方面，钢筋混凝土屋架，V形折板，薄腹梁已得到广泛应用。林同炎设计的旧金山地下展厅，采用钢筋混凝土拱共16片，跨度为83.8m，拱的推力达4.8万kN。意大利都灵展览馆拱顶由装配式构件组成，跨度达95m，非常宏伟、壮丽。由钢筋混凝土薄壳组成的屋盖更是风格多样，跨度可以很大。如美国西雅图金群体育馆采用圆球壳，跨度达202m。南斯拉夫贝尔格莱德展览馆，采用带肋的圆球顶，直径约110m。澳大利亚悉尼歌剧院于1959年动工兴建，1979年竣工，主体结构采用由三组巨大的壳片（实为组合拱）组成，壳片曲率半径为76m。整个结构建于186m×97m的现浇钢筋混凝土基座上。建筑涂成白色，状如帆船，在蓝色的海洋上显得十分清秀、美丽，成为悉尼的标志性建筑，已经成为世界著名风光建筑。

1.2.3 桥梁工程

在桥梁建筑方面，中小跨度桥梁中很大一部分采用钢筋混凝土建造。结构形式有梁、拱、桁架等。有些大跨度桥梁虽然采用钢悬索或钢制斜拉索，但其桥面结构也常用混凝土结构。预应力简支桥梁在20世纪20~50年代已广为应用。1976年洛阳黄河桥，共67孔由跨度为50m的简支梁组成。1989年建成的厦门高集跨海大桥，主跨46m，桥体结构由平行的两个带翼箱形梁组成，跨过高崎-集美海峡。由钢筋混凝土建造拱桥有较大优势。1960年葡萄牙建成的波尔图拱桥，跨度达到270m，其拱顶厚3.0m，拱脚处厚4.0m。1964年建成的巴西巴拉圭的巴拉那一约基拱桥，跨度达290m，其拱顶厚3.2m，拱脚处厚4.8m。格拉载斯威尔桥也是1964年建成的拱桥，拱跨达304.8m，拱顶厚4.26m，拱脚处厚7.0m。目前世界上最大的混凝土拱桥是克罗地亚的克尔克II号桥，形式为敞肩拱桥，跨度达390m，拱券厚6.5m，是等截面的。第二长的拱桥是日本于1989年建成的别府明礬桥，跨度为30m+351m+30m。我国最大的铁路拱桥为丰沙线上永定河七号桥，跨度达150m。公路拱桥在我国应用很广，江南水乡处处可见混凝土拱桥。1989年建成的四川涪陵乌江桥，全长351.83m，主跨200m，为拱结构，矢跨比为1/4，是我国目前跨度最大的拱桥。钢筋混凝土刚架桥在铁路、公路中也广为应用。如广东洛溪跨越珠江的洛溪大桥，采用刚架结构，桥面与墩身整体刚接，主跨达180m。我国西南交通重要干线南昆铁路上，有许多桥梁采用混凝土结构，其中清水河大桥，主桥三跨为72m+128m+72m，为预应力连续刚架结构。桥梁主跨128m，是我国铁路桥梁中的最大跨度，其中4号桥墩高100m，是世界上最高的铁路桥墩。超过500m跨度的大桥往往采用悬索桥或斜拉桥，但目前也常与混凝土结构混合使用。如香港青马大桥，跨度1377m，桥体为悬索结构，其中支撑悬索的两端立塔高203m，是混凝土结构。又如上海杨浦大桥，主跨602m，为斜拉桥，其桥塔及桥面均为混凝土结构。

1.2.4 特殊结构与高耸结构

混凝土结构在道路、港口工程中也有大量应用，贮水池、贮仓构筑物、电线杆、下水

管道等均可采用混凝土结构。由于滑模施工方法的发展,许多高耸建筑可采用混凝土结构。目前世界上最高的混凝土构筑物,当推加拿大多伦多电视塔,塔高 553.3m (包括了钢天线部分),1975 年建成。其截面主体中间为圆筒,在塔楼以下有 Y 形肢翼相连。塔楼建于 335m 处,人们可以乘电梯到塔楼观光或用餐。第二高的混凝土建筑物为莫斯科奥斯坦金电视塔,高 533.3m,1967 年建成。我国混凝土电视塔中超过 400m 高的有天津电视塔,高 415.2m,北京中央电视塔,高 405m,这两座电视塔均为截锥形。

1.2.5 水利及其他工程

在水利工程中,因混凝土自重大,其中砂石比例大且易于就地取材,故常用来修建大坝。如瑞士狄克桑斯坝,坝高 285m,是目前世界上最高的重力坝,坝顶宽 15.0m,坝底宽 225m,坝长 695m,库容量 4 亿 m^3 。美国胡佛坝,为 1936 年建成的混凝土重力坝,高 221m,坝顶长 379m,顶厚 14m,底宽 202m,它在混凝土建坝史上被认为是一个里程碑,因兴建该坝时,采用分块浇筑法,解决了大体积混凝土的收缩和温度应力问题,为以后修建大坝提供了成功经验。巴西和巴拉圭共有的伊泰普水电站,装机容量为 1260 万 kW,是目前世界上装机容量最大的水电站,其主坝高 196m,长 1060m,为混凝土坝。我国龙羊峡水电站是青海省内黄河上游的一座大电站,拦河大坝为混凝土重力坝,坝高 178m,坝顶长 393.34m,坝顶宽 15m,底宽 80m,于 1989 年全部竣工,它是在高寒地区建成的重力坝,技术难度大,其高度在世界上列第六位。

混凝土结构在其他特殊结构中也有广泛的应用。如地下铁道的支护和站台工程、核电站的安全壳、机场的跑道、填海造地工程、海上采油平台等,这里就不一一介绍了。

1.3 混凝土结构的发展展望

混凝土已经成为现代最主要的工程材料之一,中国更是广泛应用这一材料的国家。我国水泥年产量 1997 年已超过 4 亿 t,居世界第一位。可以预见,未来混凝土仍将是一种重要的工程材料,并将在材料、结构、施工技术和计算理论等各个方面得到进一步发展。

1.3.1 材料方面

组成混凝土结构的主体材料混凝土的主要发展方向是高强、轻质、耐久、提高抗裂性和易于成型。

高强混凝土是发展方向。混凝土强度高可减小断面,减轻自重,提高空间利用率。目前国内常用混凝土的强度为 $20\sim 40\text{N}/\text{mm}^2$ (MPa),国外常用的强度等级在 C60 以上。在实验室内,我国已经制成 C100 以上的混凝土,美国已制成 C200 混凝土。估计在不远的将来,常用混凝土的强度可达 $100\text{N}/\text{mm}^2$ 以上。在特殊结构(如高耸、大跨、薄壁空间结构等)的应用中,可配置出 $400\text{N}/\text{mm}^2$ 左右的高强混凝土。目前,高强混凝土的塑性不如普通强度混凝土,研制出塑性好的高强混凝土仍然是当今要研究的问题。

外加剂的发明与应用为混凝土性质的改善起到了很大的作用。目前的外加剂主要有四类:①改善拌合物流动性的外加剂,如各种减水剂、增塑剂;②调节混凝土凝结时间的外加剂,如缓凝剂、早强剂、速凝剂等;③改善混凝土耐久性的外加剂,如引气剂、防水剂、阻锈剂等;④改善混凝土其他性能的外加剂,如加气剂、防冻剂、膨胀剂、着色剂等。今后一段时间各种高性能的复合型外加剂还会不断地被研制出来,尤其是高强度、自

流密实混凝土的外加剂，可使混凝土免去振捣工序，对混凝土施工工艺会产生重大影响。地下工程、隧道支护工程中使用的喷射混凝土要求早凝结、少回落，但在喷射前又要有大流动性，这类外加剂也是需要进一步研制的。

粉煤灰等工业废料的利用目前已经有一定成效，但质量稳定性、利用率等还有待进一步开发研究。

纤维混凝土因为改善了混凝土的抗裂性、耐磨性和延性，在一些有特殊要求的工程中已开始应用。目前增强纤维主要是钢纤维，但问题是钢纤维的生产加工和拌合比较麻烦。今后随着生产工艺的改进，纤维混凝土可望在高层、桥梁、地下、水工、核电站等各个方面进一步推广应用。

随着化工、高分子聚合物生产的发展，掺入高分子化合物的混凝土，如浸渍混凝土、聚合物混凝土、树脂混凝土等会得到发展和应用，目前大多数处于实验研究阶段。实验研究显示，这类混凝土不仅抗压性能好，抗拉性能也好，而且耐磨、抗渗、抗冲击、耐冻等性能均大大优于普通混凝土。随着聚合物混凝土的逐步推广应用，必然会引起新的结构的发展。

为了减轻混凝土结构的自重，国内外都在大力发展轻质混凝土。轻质混凝土主要采用轻质骨料。轻质骨料主要有天然轻骨料（如浮石、凝灰岩等），人造轻骨料（页岩陶粒、黏土陶粒、膨胀珍珠岩等）和工业废料（如炉渣、矿渣、粉煤灰等）。轻质混凝土的密度小于 $1800\text{kg}/\text{m}^3$ 。瑞典已经研制成超轻混凝土，密度比水小，可作屋面板和墙板。轻质混凝土因自重小，有利于结构抗震，吸收冲击能快，隔热隔声性能好。对于利用工业废料的轻质混凝土可以变废为用，减少占用农田，减轻环境污染，应大力推广应用。轻质混凝土强度等级一般为 LC15~LC20，高强度轻质混凝土已在实验室中配置成功，今后会进一步得到应用。

碾压混凝土是近期发展起来的一种新型混凝土，可用于大体积（如大坝、大型设备基础等）混凝土及公路路面等。日本于1978年采用碾压混凝土建造重力坝。碾压混凝土的水灰比很低，坍落度极小，在未凝结前其性能与普通混凝土大不相同，施工中不用振捣，而用大型碾压机碾压，凝固后其性能又与普通混凝土相近。因为这种混凝土不用振捣，工序简单，机械化程度大大提高，施工条件改善，施工工期可大大缩短。这些优点使得碾压混凝土会得到推广应用。碾压混凝土分层碾压，层间结合需要进一步研究，碾压混凝土中采用钢纤维增强，可以改善碾压混凝土的抗压、抗拉强度及压缩韧性和耐磨性。

对于钢材，主要是向高强、防腐方向发展。目前普通钢筋的强度已达 $420\text{N}/\text{mm}^2$ ，在预应力混凝土中的高强钢丝强度已达 $1800\text{N}/\text{mm}^2$ ，今后钢筋及钢丝的强度可望有进一步提高。为了增强结构的耐久性，钢筋的防锈、防腐问题日益得到重视，研制出低成本、高抗腐性能的钢筋是主要研究课题。目前普通钢筋中，Ⅱ级（HRB335）、Ⅲ级（HRB400）钢筋均为带肋钢筋，粘结力较好。而高强钢丝往往是光圆的，如何生产粘结力好的高强钢丝是值得研究的课题。

1.3.2 结构方面

钢和混凝土组合结构是值得注意的发展方向。型钢与混凝土组合用于桥梁、房屋建筑已经有一段历史。在约束混凝土概念的指导下，外包钢混凝土组合柱已经在火电厂主厂房，石油化工企业的构筑物中得到应用。钢管混凝土在地下铁道、桥梁、高层中已开始广

泛应用，目前我国已经有了这方面的设计和施工规程。钢-混凝土组合结构、钢筋混凝土（劲性钢筋混凝土）和钢管混凝土由于具有强度高，截面小，延性好的优点，加之施工简化（钢筋可代替支架，钢板、钢管可作模板使用等）、缩短工期，在以后必将得到更加广泛的应用。

预应力混凝土是 20 世纪工程结构的重大发明之一，现在已经有先张法、后张法、无粘结预应力等技术。预应力技术在将来还会有大的发展。在锚具方面应发展高效而耐久的锚夹具。在施加预应力方面也会有新技术出现，如近期在国内外已经研究将预应力用于组合结构，方法是带有拱度的工字形钢梁，在加载状态下的下翼缘浇筑混凝土，当混凝土达到一定强度后卸载，这样下翼缘的混凝土即受到预应力。这种方法不需要锚夹具，具有应用前景。又如体外张拉预应力索技术，开始只用于补强和加固，目前也已经开始用于新结构，体外张拉预应力可避免制孔、穿索、灌浆等工序，并且在发现问题时易于更换预应力索。对于预应力技术，不论在张拉方法、形式还是在锚夹具的改进等方面，还会有进一步的发展。

在工程结构的实践上，许多大型、巨型工程都将应用混凝土结构。人口增长，城市发展，土建工程会向空间发展，如超高层建筑等；向地下发展，如地下交通、地下商场等；向海洋发展，如填海造地、人工岛等，这些工程的建设必将扩大混凝土的应用，建造出更加宏伟的建筑来。现在美国已经有人把月球上取回的土煨烧制成水泥，设想在月球上建造房屋及人类活动中心，大部分材料就可以就地取材，只要带上水就可以制造混凝土。至于越海、越江隧道，环球地铁的建造均离不开混凝土结构的支护。可以展望混凝土结构在未来的工程建设中会发挥更大的作用。

1.3.3 计算理论

钢筋混凝土分析方法一方面与数学、力学的发展有关，另一方面与实验技术的进步有关。随着计算机应用的普及和有限元方法的进展，钢筋混凝土结构的非线性有限元分析已经开始应用并将继续扩大。钢筋混凝土有限元分析针对混凝土的特点，有以下几个问题需要进行深入研究。（1）混凝土的破坏准则。这是关于混凝土在不同比例三向应力作用下的破坏准则。已知的古典强度理论大多有 1~2 个参数，难以确切反映混凝土的破坏规律。对此，国内外学者提出了不少计算准则，其中参数有 3~5 个。尽管如此，一些学者在高三轴应力下破坏曲线的走向还有不同观点，更不用说比较一致的表达式了。此外，为了考虑三轴应力下塑性变形及应力软化的特点，有许多学者建议在应变空间建立破坏准则，但这有待进一步实验证实。（2）混凝土的本构关系。如果说破坏准则在一定范围内比较成熟的话，则本构关系需要研究的问题更多。在不同应力比下加载时各应力之间的相互作用；非比例加载下不同应力路径的本构关系；卸载再加载、尤其是反向加载的应力应变关系，都还不能说已经搞得很清楚。现在比较常用的是将一维的 $\sigma - \epsilon$ 关系在某种相当条件下推广到二维或三维，这当然是简单易行的，但是显然还比较粗糙，有待进一步改进。（3）钢筋与混凝土间的粘结关系，这是两种材料共同工作的基础，在钢筋混凝土有限元分析中起重要作用。但是这种粘结作用的物理关系还没有搞得很清楚，比较多的是基于拔出试验，但拔出试验是在一段长度内的综合结果，很难反映真正的 $\tau - s$ （粘结-滑移）关系，由于钢筋与混凝土间难以非破坏地嵌入测试元件， $\tau - s$ 关系就很难直接测定。另外在有限元模型上还有困难，目前最常用的是双弹簧模型或双滑片（无厚度四边形滑移单元）模型，但这

又很难用于三维分析。(4) 钢筋的本构关系。与混凝土相比钢筋的本构关系比较简单,但在屈服以后如何简化则还有待进一步研究。(5) 裂缝处理。混凝土开裂后对结构性能有很大影响。由于裂缝出现有一定的随机性,并且在第一条裂缝出现后其周围应力释放,要隔一定间距才产生新的裂缝,此外,裂缝分布是不规则的,这些都给裂缝处理带来很大的困难。目前处理裂缝的主要方法有两种,一种是处理为单个裂缝,有裂缝就设为单元边界;另一种是弥散裂缝,用单元开裂来代替单独裂缝。但是对于一般结构来讲要一条一条裂缝去计算,几乎是不现实的。用弥散法去处理裂缝与单元划分有关。因而对裂缝的处理是国内外学者仍然很关心的问题。(6) 时效问题。对长期荷载来讲,应考虑混凝土的收缩和徐变,但这无论对收缩徐变本身变化规律,还是从其计算方法来讲,都还不能说已经研究得很清楚了,这方面的工作需要更多的努力。

对于框架、板壳,可以用极限平衡法求其破坏荷载。在板、壳中塑性铰线法已经广为应用,但其求得的极限荷载是上限。另一种方法“板带法”求得的是下限,对设计来讲是偏于安全的。这一方法在英国已列入规范,在美国也已写入教科书,不久可与塑性铰线法一样得到推广应用。此外用极限平衡法求得的极限荷载可估计承载力的安全度,但在荷载下如何保证使用极限状态还是一个需要认真研究的问题。

对于钢筋混凝土基本构件的计算,在单种荷载作用下的强度计算,基本上已经形成体系,有关规范给出的计算公式也可以满足工程要求。但是,有关变形的计算仅限于受弯构件,并且其精度还不能令人满意,有待研究改进。钢筋混凝土在复合受力或反复荷载下的计算理论相当复杂,实验数据又不是很充分,其设计建议还相当粗略,今后在这方面的研究会有更多的成果。美籍华人徐增全提出统一桁架理论,将平衡、协调和混凝土应力应变关系包括软化段组合在这一理论中,故又称软化桁架理论,这有可能解决剪力传递强度问题,对深梁、剪力墙、墙板的受剪以及剪、扭复合受力构件的计算提供了一条有效途径。美国学者 Kotsovos 提出了应力路径的概念,即结构承担的荷载总是通过内部的拉力和压力传到支座上去的,如在这一途径上配置合适的钢筋,拉力区可以直接配置受拉钢筋,压力区可以配置压筋或约束混凝土的钢筋,就可以提高或改善结构的强度。这一方法具有相当的直观性,其有效性也部分地为实验所证实,是值得进一步研究的一种新理论。

在可靠度方面,已经经历了基于经验的单一安全系数法,基于部分统计数字的多系数法,目前又采用了以概率论为基础的分项系数法。实际上工程结构的可靠度包括在设计、施工和使用维护的全过程中,而目前的规范大多限于设计阶段。有许多学者提出了全过程可靠度的思想。此外,影响结构可靠度的不确定因素很多,从性质上大致可以分为随机性、模糊性和信息不完全性三类。目前,在可靠度的设计方法中,比较多的只是考虑了事物的随机性。随机性事件是在一次试验中,并不能预计出现的某种必然结果,而是在重复多次的试验中会呈现的统计的规律性。例如,住宅楼面有多大荷载,是有随机性的,但经过大量的统计,我们可以确定其平均值及标准差,从而可以在具有一定保证率的前提下推算设计应采用的荷载值。处理随机性的数学方法是概率论、数理统计和随机过程等。现在一些国家及我国建筑结构设计已经应用以概率论为基础的可靠性设计原则。但实际应用还是很初步的,因为许多因素的统计资料不全,甚至还未进行系统统计。更何况我国有些部门还停留在单一综合安全系数设计法的阶段,因此对概率论和实际计算方法的改进均需进行更深入、仔细的研究。

事物的模糊性在可靠性中也有反映,例如工程结构中常用的一些术语,如“正常使用”与“不正常使用”,耐久性“好”、“良好”、“不好”之间并非有绝对明确的界限,即有模糊性。有些本来无明确界限的事情,往往进行了主观划分,其实是很不合理的,如容许应力为 30N/mm^2 ,如果是 29.5N/mm^2 ,也不一定不安全。在可靠性理论的研究中有些学者已经开始考虑事物的模糊性,提出“模糊可靠度”等概念,有些学者已经将模糊数学方法用于地震烈度的综合评定等。事物的信息不完全性在结构设计和施工中是经常遇到的。信息完备的系统称为白色系统,毫无信息的系统称为黑色系统,部分信息已知的称为灰色系统。在工程结构设计中由于对情况认识不完全,或对决策者不能提供完备的信息,就会遇到灰色系统问题。现在已有不少学者利用“灰色系统理论”、神经网络理论”来研究可靠度中的信息不完全确知性。

总之,在可靠性理论中综合考虑事物的随机性、模糊性和灰色性是将来各国学者的研究热点课题之一。

此外,动力可靠度、疲劳可靠度等问题还只停留在少数学者的研究上,付之实际应用还有很多工作要做。

1.3.4 施工技术

在钢筋混凝土施工过程中,施工技术的改进起了很大的作用。预应力的发明使得混凝土结构的跨度大大增加,滑模施工法的发明使得高耸筒体结构施工速度大为加速,泵送混凝土的出现使得高层、大桥的建设可以方便地整体浇筑,蒸汽养护法使预制构件的成品出厂时间大大缩短。展望不久的将来,混凝土施工技术还会有很大的发展。

在模板方面,已经经历了现场木工支模到工具式模板的发展,目前有木模板、钢模板、竹模板和硬塑料模板等。模板目前的作用仅限于为混凝土成型,今后会向多功能发展。模板能否作为结构的一部分,即发展薄片、美观、廉价而又与混凝土结合牢固的模板,混凝土浇筑完了,即可作为结构的一部分参与受力,而不再拆除,如外观很美,还可以省去装修工序。又如,透水木模,因混凝土中的多余水分对强度和耐久性不利,日本已有学者采用棉花贴于木模内,布眼极小,可以滤去多余的水分,但是水泥颗粒不能通过。这样的模板可以大大改善混凝土的密实性和耐久性,我国也有一些高校开始试验。在高耸筒体结构中,滑模施工是一个很大的发明,但滑模施工管理、控制比较复杂,目前国外已在推广跳模(爬模),即在浇筑完一段混凝土后,模板脱开混凝土表面向上爬升,浇筑在白天,爬升在夜间,功效大大提高,管理也较简单一些。总之,无论是在模板支护还是在其他功能方面,模板技术还会有较大的发展。

在浇筑混凝土工艺方面,传统方法是水泥、骨料加水后一起搅拌。有些学者已经提出不同的搅拌法,如先拌净浆后加骨料法、先拌砂浆后加石料法等,可以在同一配比条件下提高混凝土的强度。这种方法的原理是使水泥在水中分散充分均匀,在骨料外包裹紧密,改善了界面,从而提高混凝土强度。这种方法可以在不增加原材料(水可以适当减少)的条件下取得好的效果,但搅拌工序较繁。这样的原理以后也可以用于泵送混凝土,即将骨料与水泥浆先各自运送,到达目的地后再拌合浇筑这样水泥浆单独泵送,会减少阻力,泵送高度增大,距离加长。

对特种混凝土,如地下工程中的喷射混凝土,大体积或路面混凝土中的碾压混凝土,除了在材料上加以改进外,在施工工艺上也会有很大改进。在混凝土的施工缝处理上,为

改善接缝质量，已经发展了二次捣固法、清除浮浆法等。但其技术细节，如掌握二次振捣的最佳时间等，还有待进一步研究。

在钢筋绑扎和成型中，应大力发展各种钢筋成型机械及绑扎机具，以减少大量的手工操作。钢筋接头，已有绑扎搭接、焊接、螺栓及挤压连接等多种方式，随着化工胶粘剂的发展，将来粘接技术会有大的发展。钢筋还有一个重要问题是防锈、防腐。国外已有用不锈钢或特种钢筋配筋的，但成本太高。目前国外还发展了一种阴极保护法，效果不错，但大多限于重大工程。还有，关于钢筋的加工成型自动化，利用计算机辅助工程技术，将钢筋翻样、下料、成型全过程自动化的研究会有更大的进展。

在养护方面，有天然养护和蒸汽养护，后者大多限于预制构件厂，现场采用有很大困难。目前国外发展远红外热养护，这一技术有望在现浇混凝土施工现场推广。在工厂生产预制构件时，可将蒸汽养护与远红外辐射养护结合起来，可节约能源、提高功效。在现场浇筑混凝土时也有人设想用电热钢模板来缩短混凝土的养护时间，这是一种可行的施工技术，值得进一步研究推广。还有一个动向是广泛采用养护液（养护薄膜，又称养生液），该法将养护液喷洒于新生混凝土表面，快速干燥，形成一层极薄的封闭膜，可以有效地保护混凝土中的含水量，充分利用水泥水化热使混凝土早强，且后期强度也有提高。这种方法比铺草袋、浇水养护效果有明显提高，且施工现场操作简易，应大力推广。

1.3.5 耐久性

混凝土结构的耐久性，目前国际上受到广泛重视，欧洲、日本等国家和地区已经开始将耐久性问题列入有关规范中。但耐久性问题仍然是一个研究热点。我国20世纪50年代兴建的房屋、码头等建筑已经进入老龄服役期。尤其是我国沿海及近海地区的混凝土结构，由于混凝土腐蚀和钢筋锈蚀而造成结构的早期损坏，有的已经不能使用，有的要花大量的财力物力进行维修后才能继续使用。目前耐久性问题也已经作为我国有关部委的重点研究课题，有的单位也已经提出有关耐久性问题的建议和规范草案。结构耐久性问题可以分为两大类型：①新建结构耐久性设计；②已建结构的耐久性评估鉴定。

耐久性设计涉及到建筑周围环境，结构设计、施工、用料、维护和管理等多方面因素，是一个很复杂的问题。1989年欧洲混凝土委员会（CEB）建议使用“CEB耐久性混凝土设计指南”，其中分为A篇、B篇。A篇为“理论基础”，介绍了影响混凝土结构耐久性的主要因素及相互影响关系，还介绍了混凝土中气体、水及溶解于水中的有害物质的迁移和结合机理，对混凝土的抗冻性、抗渗性及耐久性等从理论上加以阐明，对混凝土中钢筋的锈蚀机理及其与环境条件的关系也作了理论上的说明。B篇为“实用建议”，对环境作了暴露等级的划分，耐久性设计、施工和维护要点及原则建议。1990年欧洲混凝土委员会与预应力委员会制定的CEB-FIP模式规范（混凝土结构）对耐久性设计原则有了更细致的规定。

日本土木学会于1989年8月公布了“混凝土结构耐久设计标准（试行）”，共分五章：总则、耐久性问题的探讨方法、环境指数、耐久指数、耐久性要点。这一设计标准的基本思想是要求各构件的耐久性指数 T_p 应大于或等于环境指数 S_p 。耐久性指数 T_p 是根据结构使用的材料、设计方案、施工条件及表面涂料防护等因素进行综合评价而得，而环境指数是根据所建结构所处环境条件及结构不需要维修的年限而确定的。这一设计标准主要是依据经验，定量分析较少。