

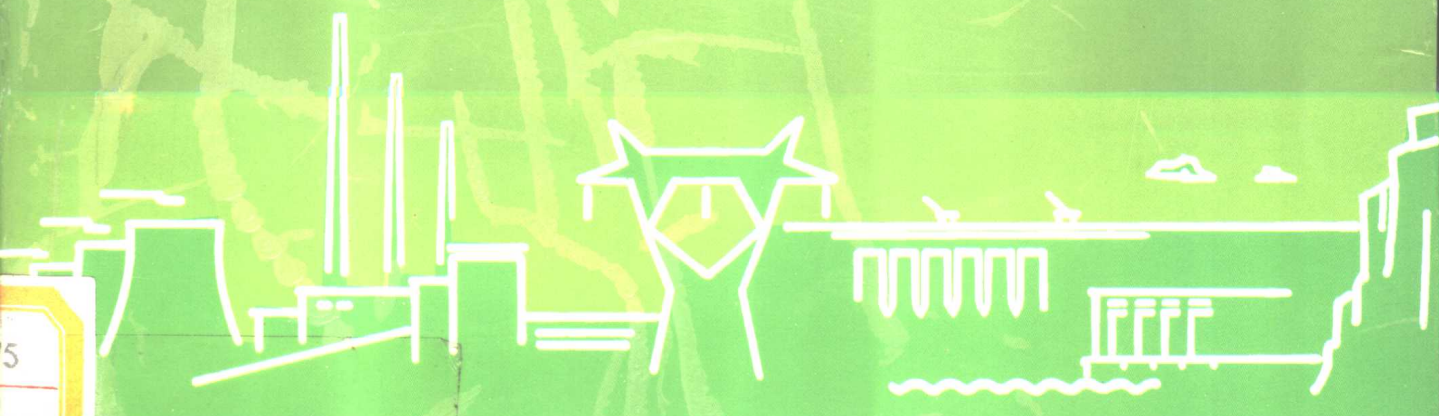


普通高等学校水电工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

高等钢筋混凝土结构学

大连理工大学 赵国藩 主编



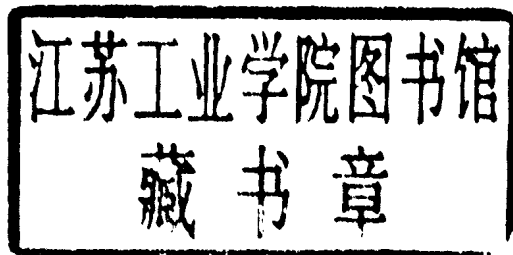
中国电力出版社

普通高等学校水电工程类专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

高等钢筋混凝土结构学

大连理工大学 赵国藩 主编



中国电力出版社

内 容 提 要

本书共十一章。主要内容为钢筋混凝土结构的设计方法及可靠度理论,材料的本构关系和破坏准则,钢筋与混凝土的粘结及骨料咬合作用,正截面、斜截面强度计算,裂缝与变形,预应力混凝土,结构的延性与抗震验算,混凝土结构的疲劳,高强混凝土、纤维混凝土性能及结构计算理论。

本书是高等学校结构工程专业硕士研究生的教材或教学参考书,也可供从事钢筋混凝土结构工程的设计、施工人员,科学研究工作者参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

高等钢筋混凝土结构学/赵国藩主编.-北京:中国电力出版社,1999

高等学校教材

ISBN 7-80125-878-9

I. 高… II. 赵… III. 钢筋混凝土结构-高等学校-教材 IV. TU375

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 22619 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

实验小学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1999 年 6 月第一版 1999 年 6 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.5 印张 556 千字

印数 0001—1760 册 定价 28.50 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书是大连理工大学土木建筑学院工程结构教研室和工程结构研究室根据多年来在为结构工程研究生开设的“高等钢筋混凝土结构”、“工程结构可靠度”、“工程结构的抗震与延性”，以及“新材料结构”等课程的基础上，并参考近年来国内外在钢筋混凝土结构领域内最新研究的进展编写而成。

本书共分十一章：

第一章绪论，对国内外近年来钢筋混凝土结构的发展，从材料、结构、计算理论、耐久性、已建结构的鉴定、加固以及试验技术等方面给予简要介绍。

第二章钢筋混凝土结构可靠度设计理论，介绍了工程结构设计中影响工程结构可靠性的事物不确定性和可靠性近年研究概况，结构随机可靠度分析的基本概念和可靠度近似计算的一次二阶矩法以及今后需要继续研究的问题。

第三章介绍了复杂应力状态下混凝土的变形和强度特性，并在此基础上介绍了国内外目前比较成熟的应用较广的混凝土的破坏准则和本构关系，钢筋的本构关系。这些模型可用于钢筋混凝土结构的设计和非线性分析。

第四章介绍了钢筋与混凝土间的粘结和混凝土开裂面骨料咬合及销栓作用的试验方法。在观察试验现象的基础上，分析了钢筋与混凝土间的粘结和骨料咬合作用机理、影响因素，给出了粘结强度、骨料咬合力及销栓力的计算方法和钢筋锚固、搭接长度的确定方法，这些方法可直接用于钢筋混凝土结构的设计及分析中。

第五章正截面承载力计算，回顾了正截面承载力计算的演变和发展，介绍了正截面承载力计算的基本假定以及国内外不同规范的计算方法及特点，并对长柱进行了非线性全过程分析。

第六章斜截面受剪承载力计算，回顾了斜截面受剪承载力计算的发展，介绍了斜截面受剪承载力的试验研究，无腹筋梁、有腹筋梁的抗剪机理，几种国外规范斜截面受剪承载力的计算方法，此外还介绍了深受弯构件的设计和集中荷载作用下钢筋混凝土板的抗剪承载力计算。

第七章混凝土结构的裂缝控制及变形控制，介绍了混凝土结构产生裂缝的原因，钢筋腐蚀机理及其对裂缝发展的关系，钢筋防腐蚀措施，裂缝的检查及裂缝危害性的鉴定与评估，裂缝的修补，钢筋混凝土基本构件抗裂度、裂缝宽度及变形控制计算方法。

第八章预应力混凝土结构，重点介绍了无粘结部分预应力混凝土梁板的预应力损失、无粘结筋的应力计算、裂缝宽度和挠度的验算及构造规定，超静定预应力混凝土结构的特点和分析方法，主要介绍了实用的弹性分析法、等效荷载法和荷载平衡法。

第九章钢筋混凝土结构的延性与抗震，介绍了延性的基本概念，单调荷载下和低周反复荷载下钢筋混凝土梁、柱、节点的受力变形性能，结构塑性设计方法与延性的关系，以

及结构抗震性能与延性的关系。

第十章钢筋混凝土结构的疲劳，介绍了钢筋混凝土受弯构件的疲劳变形和裂缝宽度的计算方法，钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件正截面和斜截面的疲劳强度计算方法。

第十一章高强混凝土和纤维混凝土的性能及其结构设计理论，介绍了高强混凝土和纤维混凝土的原材料、配合比和施工的特殊要求，工程应用和主要的结构设计计算方法。

全书在高等学校本科教材的基础上，力求内容系统并尽可能避免与之重复，为研究生学习及科技人员的创新提供较新的材料，但由于编者的水平有限，书中定有疏漏不妥之处，敬请读者批评指正。

本书第一、二、七章由赵国藩编写，第三、四、八、十章由宋玉普编写，第九、十一章由黄承造编写，第五、六章由王清湘编写。全书由赵国藩和宋玉普修改全稿，由赵国藩主编，河海大学周氏教授主审。编者对主审人及中国电力出版社的编辑为改进本书质量所付出的辛勤劳动，表示衷心感谢。

编者

1998年10月

目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第一节 材料	1
第二节 结构	4
第三节 计算理论	5
第四节 耐久性	8
第五节 已建结构的鉴定与加固	10
第六节 试验技术	11
参考文献	11
第二章 钢筋混凝土结构可靠度设计理论	13
第一节 概述	13
第二节 结构随机可靠度分析的基本概念和方法	15
第三节 结构可靠度分析的一次二阶矩方法	22
第四节 继续研究的问题	50
参考文献	51
第三章 混凝土和钢筋的本构关系和破坏准则	54
第一节 概述	54
第二节 复杂应力下混凝土的变形和强度特性	54
第三节 混凝土的破坏准则	65
第四节 混凝土的本构关系	75
第五节 钢筋的本构关系	89
参考文献	92
第四章 钢筋与混凝土间的粘结及混凝土开裂面骨料咬合作用	96
第一节 概述	96
第二节 钢筋与混凝土间的粘结试验	96
第三节 粘结机理及影响因素	99
第四节 粘结强度计算及钢筋锚固和搭接长度的确定	103
第五节 混凝土开裂面骨料咬合及销栓作用试验	111
第六节 骨料咬合作用机理及影响因素	113
第七节 骨料咬合力及销栓力的计算	113
参考文献	116
第五章 正截面承载力计算	118
第一节 正截面强度计算的发展	118
第二节 正截面承载力计算的基本假定	122

第三节	正截面承载力计算	126
第四节	长柱的分析	144
	参考文献	152
第六章	斜截面受剪承载力计算	154
第一节	斜截面受剪承载力计算的发展	154
第二节	斜截面承载力的试验研究	157
第三节	无腹筋梁的抗剪机理	165
第四节	有腹筋梁的抗剪机理	169
第五节	国外主要规范的斜截面承载力计算	172
第六节	深受弯构件设计	177
第七节	集中荷载作用下钢筋混凝土板的抗剪承载力	182
	参考文献	188
第七章	混凝土结构的裂缝控制及变形控制	190
第一节	前言	190
第二节	混凝土结构产生裂缝的原因	190
第三节	钢筋腐蚀机理及其对裂缝发展的关系	193
第四节	钢筋防腐蚀的措施	200
第五节	裂缝的检查、裂缝危害性的鉴定与评估	202
第六节	混凝土结构裂缝修补	204
第七节	钢筋混凝土构件正截面抗裂度验算	210
第八节	钢筋混凝土构件裂缝宽度的计算	215
第九节	钢筋混凝土受弯构件变形控制的计算	226
	参考文献	229
第八章	预应力混凝土结构	231
第一节	概述	231
第二节	无粘结部分预应力混凝土梁板	232
第三节	超静定预应力混凝土结构的特点和基本概念	244
第四节	超静定预应力混凝土结构的弹性分析法	247
第五节	超静定预应力混凝土结构的等效荷载分析法	249
第六节	超静定预应力混凝土结构的荷载平衡法	255
	参考文献	261
第九章	钢筋混凝土结构的延性与抗震	263
第一节	概述	263
第二节	单调荷载作用下构件截面的曲率延性	265
第三节	结构的位移延性和塑性铰转角能力	276
第四节	结构的极限设计与延性保证	278
第五节	地震和低周反复荷载作用下结构的滞回特性和破坏形态	286
第六节	结构的抗震设计与延性保证	300
	参考文献	317
第十章	钢筋混凝土结构的疲劳	321

第一节 概述	321
第二节 钢筋混凝土受弯构件的疲劳变形和裂缝	322
第三节 钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件正截面疲劳强度	333
第四节 钢筋混凝土和预应力混凝土受弯构件斜截面疲劳强度	340
参考文献	346
第十一章 高强混凝土和纤维混凝土的性能及其结构设计理论	348
第一节 高强混凝土的性能	348
第二节 高强混凝土的结构性能和设计方法	354
第三节 纤维混凝土增强机理和性能	359
第四节 钢纤维混凝土结构设计计算	371
参考文献	378
附录	380

第一章 绪 论

混凝土是现代工程结构的主要材料,我国每年混凝土用量约 9 亿 m^3 ,钢筋用量约 2000 万 t,规模之大,耗资之巨,居世界前列。经测算,我国工程建设中仅混凝土结构每年需耗资 2000 亿元以上^[1]。可以预见,钢筋混凝土将是我国今后相当长时期内的一种重要的工程结构材料。在此,对钢筋混凝土的发展从材料、结构、计算理论、耐久性、已建结构的鉴定与加固、试验技术等几个方面给予简要介绍。

第一节 材 料

物质是基础,钢筋混凝土结构设计理论在很大程度上是与其所用材料的发展密切相关的。

(一) 混凝土

组成钢筋混凝土主要材料之一的混凝土的发展方向是高强、轻质、耐久、抗震、抗爆、抗冲磨。

1. 高性能混凝土

高性能混凝土是近年来混凝土材料发展的一个重要方面,高性能是指混凝土具有高强度、高耐久性、高流动性等多方面的优越性能。从强度而言,抗压强度大于 C50 的混凝土属于高强混凝土,提高混凝土的强度是发展高层建筑、高耸结构、大跨度结构的重要措施。采用高强混凝土可以减小截面尺寸,从而减轻自重,起到相辅相成的作用,因而获得较大的经济效益。我国已制成 C100 的混凝土。文献报导^[31],国外在试验室的条件下水泥石的强度达到 662MPa (抗压) 及 64.7MPa (抗拉)。在实际工程中,美国西雅图双联广场泵送混凝土 56d 抗压强度可达 133.5MPa。

在我国为提高混凝土强度采用的主要措施有:①合理利用高效减水剂,采用优质骨料、优质水泥,利用优质掺合料,如优质的磨细粉煤灰、硅粉、天然沸石或超细矿渣^[2]。采用高效减水剂以降低水灰比是获得高强混凝土的主要技术措施。②采用 525、625 号及 725 号的硫铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥及相应的外加剂是中国建筑材料科学研究院制备高强混凝土的主要技术措施。③以矿渣、碱组分及集料制备碱矿渣高强度混凝土是重庆建筑大学在引进前苏联研究成果的基础上提出研制高强混凝土的技术措施。④天津港湾工程研究所采用复合高效减水剂,用 525 号水泥 $320\text{kg}/\text{m}^3$ 、水灰比 0.43,和 425 号水泥 $480\text{kg}/\text{m}^3$ 、水灰比 0.32,在试验室中制成了 68MPa 和 65MPa 的高强混凝土。

高强混凝土具有优良的物理力学性能及良好的耐久性,但是延性较差,是其主要缺点。在高强混凝土中加入适量的钢纤维,作成纤维增强高强混凝土,可以提高其抗拉、抗弯、抗剪强度,大幅度地提高韧性(延性)和抗疲劳、抗冲击等性能。

在高层建筑的高强混凝土柱中，也可采用 X 形配筋、劲性钢筋或钢管高强混凝土等结构方面的措施来改善高强混凝土柱的延性和抗震性能。辽宁省物资大厦工程的底层柱中就已成功地应用了加钢管的 C80 高强混凝土^[3]。

2. 轻集料^[4]

利用天然轻集料（如浮石、凝灰岩等）、工业废料轻集料（如炉渣、粉煤灰陶粒、自然煤矸石等及其轻砂）、人造轻集料（页岩陶粒、粘土陶粒、膨胀珍珠岩等及其轻砂）制成的轻集料混凝土具有容重较小、相对强度高以及保温、抗冻性能好等优点。利用工业废渣，如废弃锅炉煤渣、煤矿的煤矸石、火力发电站的粉煤灰等制备轻集料混凝土，可降低混凝土的生产成本，并变废为用，减少城市或厂区的污染，减少堆积废料占用的土地，对社会环境也是有利的。

3. 纤维增强混凝土^[5]

为了改善混凝土的抗拉性能差、延性差等缺点，在混凝土中掺加纤维以改善混凝土性能的研究发展得相当迅速。目前研究较多的有钢纤维、耐碱玻璃纤维、聚丙烯纤维或尼龙合成纤维等。

在承重结构中，发展较快、应用较广的是钢纤维。钢纤维主要有用于土木建筑工程的碳素钢纤维和用于耐火材料工业中的不锈钢纤维。用于土木建筑工程的钢纤维主要有以下几种生产方法：①钢丝切断法；②薄板剪切法；③钢锭（厚板）铣削法；④熔钢抽丝法（简称熔抽法）。

当纤维长度及长径比在常用范围，纤维掺量在 1%~2% 体积率的范围内，与基体混凝土相比，钢纤维混凝土的抗拉强度可提高 40%~80%，抗弯强度提高 60%~120%。抗剪强度提高 50%~100%。抗压强度提高较小，在 0~25% 之间。弹性阶段的变形性能则没有显著差别。

韧性是衡量钢纤维混凝土塑性变形性能的重要指标，在通常的纤维掺量下，与基体混凝土相比，抗压韧性可提高 2~7 倍，抗弯韧性可提高几十倍到上百倍，冲击韧性可提高几倍到几十倍。

钢纤维混凝土的抗弯和抗压疲劳性能以及抗磨性较普通混凝土都有较大改善。

钢纤维混凝土的工程应用相当广泛。例如可用于三维复杂应力部位；用于预制桩的桩尖与桩顶部位，可取消桩顶防护钢板和铁制桩尖，并减少两端横向钢筋网的数量；用于抗震框架节点区，可减少钢筋用量，便于浇筑节点区的混凝土；用于受弯受拉作用的水管、刚性防水屋面、地下人防工程、地下泵房和地下室的防水，均可取得良好的效果。

在桥梁建筑中，在混凝土拱桥受拉区段用钢纤维提高抗拉强度，可降低主拱高度，减轻拱圈自重。钢纤维混凝土用于桥梁桥面新建或大修，用于修筑或改建公路路面及机场道面，可大大延长维修的周期。在铁路小半径曲线及轨道接头两侧，用钢纤维增强的预应力混凝土轨枕代替木枕等均有显著的经济价值。最近在举世闻名的三峡工程对外交通公路重载（汽-36、挂-2000kN）桥梁的桥面及钢管拱肋也采用了钢纤维混凝土^[6,7]，得到工程技术界的重视。在水工建筑中，钢纤维混凝土用于高速水流冲刷、磨损部位、闸门的门槽，渡槽的受拉区，喷射钢纤维混凝土用于水电站有压隧洞衬砌工程、大坝防渗面板、隧洞及泄

洪洞以及矿山井巷、房屋、桥墩等加固工程中；还用在海拔 4500m 的永冻地区的公路路面，国防工程中的防护门，海港港内道路及堆场罩面工程以及一些特殊结构和构件，如钢筋混凝土煤仓，市政道路的排水井篦等。

中国工程建设标准化协会于 1992 年批准颁布了“钢纤维混凝土结构的设计与施工规程”（CECS 38：92），对推广钢纤维混凝土的应用起了重要的作用。

钢纤维混凝土用常规的施工技术，其钢纤维体积率一般为 0.6%~2.0%。再多的体积率，在施工搅拌过程中钢纤维容易结团成球，影响钢纤维混凝土的质量。但是国内外正在研究一种钢纤维体积率 5%~27% 的简称为 SIFCON 的砂浆渗浇钢纤维混凝土，其施工技术不同于一般的搅拌浇筑成型的钢纤维混凝土，而是先将钢纤维松散填放在模具内，然后灌筑水泥浆或砂浆，硬化成型。SIFCON 与普通钢纤维混凝土相比，其特点是抗压强度比基体材料大幅度提高，达 100~200MPa，其抗拉、抗弯、抗剪强度以及延性、韧性等也比普通体积率的钢纤维混凝土有更大的提高。

另一种名为 SIMCON 的施工方法与 SIFCON 基本相同，只是预先填置在模具内的不是乱向分布的钢纤维（Fiber），而是钢纤维网（Mat），制成的产品——砂浆渗浇钢纤维网混凝土，其纤维体积率一般为 4%~6%。试验表明，SIMCON 较之 SIFCON 可用较低的钢纤维体积率而达到相同的强度和韧性，从而取得比 SIFCON 节约材料和造价的效果。

虽然 SIFCON 或 SIMCON 力学性能优良，但由于钢纤维用量大、一次性投资高、施工工艺特殊，只是在必要时可用于某些特殊的结构或构件的局部，如火箭发射台。

钢丝网水泥在砂浆中铺设钢丝网及架立用的骨架钢筋作为薄壁结构，具有良好的抗裂能力和变形能力，在国内外造船、水利、建筑工程中应用较为广泛。近年来，在钢丝网水泥中又掺入钢纤维建造公路路面、渔船、农船等取得了更好的双重增韧、增强效果。

4. 碾压混凝土^[8]

碾压混凝土是国内外近年发展比较快的一种新型混凝土，可用于大体积混凝土结构（如水工大坝、大型基础）、工业厂房地面、公路路面及机场道面等。

用于大体积混凝土的碾压混凝土的浇筑机具与普通混凝土不同，其平整使用推土机，振实用碾压机，层间处理用刷毛机，整个施工过程的机械化程度高，施工效率高，劳动条件好，可大量掺用粉煤灰，与普通混凝土相比，浇筑工期可缩短 1/3~1/2，用水量可减少 20%，水泥用量可减少 30%~60%。

碾压混凝土的层间抗剪性能是修建混凝土高坝的关键，这方面的研究工作国内正在开展。

在公路、工业厂房地面等大面积混凝土工程中，采用碾压混凝土，或者在碾压混凝土中再加入钢纤维，成为钢纤维碾压混凝土，则其力学性能及耐久性还可进一步改善。

5. 特种混凝土

除上述几种近年来发展较快的混凝土外，其它混凝土，如泵送混凝土、免振自密实的流态混凝土应用得比较广泛；还有水下浇筑混凝土；预先在模板内填实粗骨料，而后将水泥砂浆用压力灌入粗骨料空隙中形成的压浆混凝土；采用膨胀水泥或加膨胀剂制成的膨胀混凝土、喷射混凝土、聚合物混凝土等也得到应用。

(二) 配筋

钢筋混凝土结构的配筋材料，主要是钢筋。最近在国际上研究较多的是树脂粘结的纤维筋 (FRP) 作混凝土及预应力混凝土结构的非金属配筋。常用的纤维筋有树脂粘结的碳纤维、玻璃纤维及芳纶 (Aramid) 纤维。国外研究指出，碳纤维、Aramid 纤维及玻璃纤维制成的筋材，强度都很高，只是玻璃纤维筋的抗碱化性能较差。

在钢筋方面，为了减少裂缝宽度和构件的变形，研究采用焊成梯格形的双钢筋。

为了节约钢材用量，国内用光圆的 I 级钢筋，经过冷轧，轧成带肋的直径小于母材直径的钢筋，称为冷轧带肋钢筋。另一种类似的钢筋，也是用 I 级钢筋冷轧扭转型，称为冷轧变形钢筋或冷轧扭钢筋。这两种冷轧钢筋的抗拉强度标准值 (极限抗拉强度) 及设计值比母材 I 级钢筋大大提高，与混凝土的粘结强度也提高，但直径较小，主要用于板式构件的受力钢筋或梁、柱构件的箍筋或作预应力筋。由于强度提高，可以比 I 级钢筋节约材料用量，从而获得经济效益。这两种钢筋，国内已制订了规程。为扩大这种钢筋作为梁、柱的受力钢筋，可采用双筋或三筋的并筋，但需适当增大其锚固长度。

在海洋环境或者有腐蚀性介质的环境中，如冬季撒盐的桥面，钢筋锈蚀是影响结构耐久性的重要原因。为了防止钢筋锈蚀，用不锈钢制造钢筋是一个途径，但是价格昂贵。另一个途径是用环氧树脂涂敷钢筋表面，形成防锈的涂层，防止钢筋生锈，这种方法在日本、美国应用较多。钢筋在工厂中校直、加热、喷涂树脂粉末，形成防护薄膜，冷却后经检验合格，用于有严格防锈要求的工程，可使结构的耐久性大大提高。

第二节 结 构

(一) 钢-混凝土组合结构

近年来值得注意的发展方向之一，是钢-混凝土组合结构，如钢板混凝土用于地下结构及混凝土结构的加固，压型钢板-混凝土用于楼板，型钢与混凝土的组合梁用于楼盖或桥梁，外包钢混凝土柱用于电厂主厂房等。在钢管内浇筑混凝土，制成的钢管混凝土柱或受压构件^[9,10]，由于钢管对混凝土受力时的侧向约束作用，使管内混凝土处于三向受压状态，而管内的混凝土又对薄壁钢管有侧向支撑作用，抑制薄壁钢管的局部失稳，因而使钢管混凝土柱的承载能力和变形能力都大幅度提高。而且钢管又是混凝土的模板，在横向又代替箍筋起抗剪作用和约束作用，钢管本身在施工阶段还可起到劲性钢骨架的作用，简化施工。由于钢管混凝土有这样一些优点，因而在工程中应用较广。

在钢-混凝土组合梁中，将工字型钢腹板按折线形切开、改焊成高度更大的蜂窝形梁，既提高了抗弯能力又便于管道通过有洞的腹板，在电厂结构中已经应用^[11]。

近年来比利时、日本以及我国正在研究应用一种预弯型钢的预应力梁^[12]。预弯型钢的预应力梁是将预制的带有拱度的工字形钢梁，在加载状态下，在受拉的下翼缘浇筑混凝土，待混凝土达到一定强度后卸载，使下翼缘的混凝土预压，然后将其运至现场吊装铺设，浇筑上部混凝土，成为装配整体构件。在使用荷载作用下，下翼缘产生的外加拉应力可与预加的压应力抵消，类似于预应力混凝土叠合式结构，但施工工艺比较简单，无需锚具和张

拉设备，钢材的用量虽然比预应力混凝土结构多，但截面尺寸和自重均可减小，国外已用于修建桥梁及高层房屋建筑，已建成跨度达 60m 的公路桥，国内在辽宁、武汉、哈尔滨等地的桥梁工程中已有应用。

在网架结构中，以钢筋混凝土上弦板代替钢上弦，以组合节点代替钢上弦节点，从而形成的一种下部为钢结构、上部为钢筋混凝土结构的组合空间网架结构。这种结构可充分发挥混凝土受压、钢材受拉的材料强度，网架的竖向刚度和横向刚度大，抗震性能好，与同跨度钢网架相比，可节约用钢量 15%~25%。组合网架结构已建成近 30 幢^[13]。

(二) 预应力混凝土结构

预应力混凝土结构近年来发展也较迅速，其中引人重视的是无粘结部分预应力混凝土结构^[14~16]。无粘结预应力筋是由单根或多根高强钢丝、钢绞线或钢筋，沿全长涂抹防腐油脂并用聚乙烯热塑管包裹而成。钢筋张拉时，预应力筋对周围混凝土产生纵向相对滑动。无粘结筋像普通钢筋一样敷设，然后浇筑混凝土，待混凝土达到规定的强度后，进行预应力张拉和锚固。省去了传统的后张预应力混凝土预埋管道、穿索、压浆工艺，节省施工设备，简化施工工艺，缩短工期，节约造价，可得到综合的经济效益。从 70 年代起在我国房屋建筑中开始应用，目前已推广在公路桥梁中应用。

另外一种体外张拉的预应力索在桥梁工程的修建、补强加固中也在应用。它的特点是：与体内无粘结预应力筋一样，可免去制孔、穿索、压浆等工序，施工比较方便；大幅度减小预应力值的摩擦损失，简化截面形状和减小截面或壁厚尺寸，便于再次张拉和锚固；可以更换新索，易于增添新索，提高构件的承载能力。我国汕头海湾大桥悬索桥预应力混凝土加劲梁即采用了体外索。

国内最近在上海成都路高架桥工程采用了一种“缓粘结”预应力混凝土张拉工艺，与无粘结预应力筋类似，但预应力筋周围是用缓凝砂浆包裹，在钢筋张拉时砂浆不起粘结作用，钢筋可自由张拉，待钢筋锚固后，砂浆缓慢凝结硬化，与预应力筋相粘结。这种缓粘结张拉工艺，在张拉时，是“无粘结”，在砂浆凝结后，又是“有粘结”，具有进一步研究的意义。

在预应力混凝土结构中，借鉴前述预弯型钢预应力梁的经验，重庆交通学院于 1993 年提出了“预弯预应力混凝土梁”，又于 1995 年进一步提出了“横张预应力混凝土梁”，以混凝土梁底为反力承压面，将锚固于梁端加宽梁肋中的中段直线钢筋作横向张拉，钢筋纵向受拉伸长，混凝土梁受到所需求的预应力，而后用钢插销固定预应力筋的位置，填筑预留在下边缘明槽内的混凝土。这种横张方法，代替了常规的纵向张拉钢筋的方法，无需锚具，施工简单，有工程实用意义，已在一座 30m 跨度的公路桥梁中应用。

第三节 计算理论

(一) 钢筋混凝土结构的有限元分析方法^[17~19]

钢筋混凝土结构计算理论的发展是与力学、数学、物理学等基础学科的发展密切相关的，其中钢筋混凝土有限元是研究混凝土结构随着荷载的增加，由弹性状态过渡到弹塑性

状态,最后达到丧失承载能力的极限状态的内力和变形发展全过程的有效的弹塑性分析方法。这种方法可以给出结构内力和变形的全过程,包括裂缝的形成和扩展,结构破坏过程和破坏形态,显示出结构薄弱部位,给出结构极限承载能力等。

钢筋混凝土有限元法中,针对钢筋与混凝土两种材料组合特点、裂缝形成和扩展的特点,需要研究的主要问题有:①混凝土破坏准则;②混凝土的本构关系;③钢筋与混凝土之间的相互作用;④裂缝处理;⑤对于长期荷载,还要考虑材料的时效,主要是混凝土的徐变、收缩和温度特性。

钢筋混凝土结构的有限元分析与一般固体力学有限元分析相比,其特点是:①材料的本构关系;②有限元的离散化。考虑这些特点的钢筋混凝土结构的有限元模型有:①分离式模型;②组合式模型;③整体式模型;④有限区法模型。有限区法模型是重点模拟混凝土的不连续性和摩擦性,有别于前面三种以连续力学为基础模型。其特点是利用离散元法模拟不连续摩擦材料特性,将混凝土理想化为不同区的组合,它的应用还处于研究阶段。

在大体积混凝土结构的有限元分析中,如何从单元的开裂、破坏(屈服)来评价整体结构达到正常使用极限状态和承载能力极限状态是一个难度较大的问题。

(二) 钢筋混凝土结构的极限分析^[18]

对于板、壳、连续梁、框架结构的极限承载力,采用极限分析法直接求解,是一个发展的方向,并已有较多成果,但需保证结构的正常使用(限制裂缝和变形)和薄壁结构与细长压杆的稳定性,以及防止脆性的剪切破坏和钢筋锚固失效。

(三) 混凝土断裂力学^[20]

在计算理论中,另一个值得注意的发展方向是混凝土断裂力学在水工大坝中的应用。

国内近年来结合水工混凝土大坝的修建,由大连理工大学等单位协作进行了影响混凝土断裂参数(断裂韧度、断裂能)的各种因素(试件尺寸、骨料粒径、混凝土强度、加载龄期、加载速度等)的试验研究和理论分析。研究工作,已由I型断裂向I-II复合型断裂发展,由静态向动态发展。通过特大型混凝土试件和全级配混凝土试件的断裂韧度和断裂能的测试,证实了线弹性断裂力学可用于大体积混凝土结构裂缝评定。采用四点剪切梁试件,系统地研究了I-II复合型断裂参数。对钢纤维增强混凝土的断裂参数,也作了试验研究,证明钢纤维的掺入,对改善混凝土的断裂性能也是有效的。在理论研究方面,清华大学用分数维的方法研究混凝土的断裂过程也取得了一定的成果。

1990 CEB-FIP 模式规范(混凝土结构)根据国际材料与结构研究所联合会(RILEM)混凝土断裂力学技术委员会(TC-50FMC)所建议的标准三点弯曲缺口梁的试验资料,给出了与最大骨料粒径 d_{max} 及混凝土强度等级有关的断裂能 G_F 的估算值,但是没有考虑构件尺寸、应变速率等变化因素的影响,因而其误差可能达30%。该规范还给出混凝土断裂能 G_F 与温度和含水量的关系,对已开裂断面给出了简化的双直线受拉应力与裂缝宽度的关系,其中的参数与混凝土的断裂能 G_F 、最大骨料粒径 d_{max} 及混凝土的抗拉强度有关。这些规定虽然还不够完善,但为混凝土断裂力学的工程应用提供了基础。

(四) 混凝土的收缩与徐变

混凝土收缩与徐变的研究一直是混凝土计算理论中的一个重要方面,对水工混凝土及

预应力混凝土的计算理论影响甚大。我国水利水电科学研究院多年来进行了系统的研究,出版了专著《混凝土的收缩》^[21]和《混凝土的徐变》^[22],对影响混凝土收缩和徐变的因素,结合我国工程实际情况,提出了估算收缩的方法,介绍了六种徐变计算理论,并以试验数据为依据进行了评述,介绍了减小干燥收缩和温度收缩的措施,及结构徐变分析的数值分析方法等。

1990年CEB-FIP模式规范(混凝土结构)也对混凝土的收缩和徐变提出了有关的计算公式。

(五) 工程结构可靠度^[23~25]

工程结构包括混凝土结构,在设计、施工、使用过程中,事物具有种种影响结构安全性、适用性和耐久性的不确定性,这些不确定性大致可分为:随机性、模糊性、知识的不完善性。

(1) 事物的随机性。随机性是事件发生的条件不充分,在条件与事件之间不能出现必然的因果关系,从而事件的出现与否表现出不确定性,这种不确定性称之为随机性。处理和研究随机性的数学方法主要是概率论、随机过程、数理统计学等。在国际标准ISO2394和一些国家的规范,还有我国的各种专业的工程结构设计规范均引用以概率论为基础的可靠性设计原则,在工程应用中不断得到发展。大连理工大学对考虑随机变量相关性,对非线性程度较高的极限状态方程,提出了二次二阶矩法、二次四阶矩法,考虑随机变量相关的广义空间可靠度分析法以及体系可靠度近似分析法等;河海大学研究了随机模拟法-蒙特卡洛法的改进、随机有限元的应用等;浙江大学也研究了蒙特卡洛法的改进。

(2) 事物的模糊性。事物本身的概念是模糊的,即一个对象是否符合一个概念是难以确定的,也就是说一个集合到底包含哪些事物是模糊的,而不是明确的,主要表现在客观事物差异的中间过渡的“不分明性”,也即“模糊性”。例如工程结构中的“正常使用”与“不正常使用”,“耐久”与“不耐久”,“安全”与“危险”之间都没有客观的明确界限,其界限往往由人们主观地划分,出现了“因人而异”的不确定性。

研究和处理模糊事件的数学方法是查德(L. A. Zadeh)教授1965年创始而后迅速发展的“模糊数学”。

大连理工大学引用模糊数学研究钢筋混凝土结构正常使用极限状态的可靠度,提出了当量随机化计算方法,以及同时考虑模糊性和随机性影响的结构可靠度统一数学模型等。哈尔滨建筑大学在模糊数学用于地震烈度综合评定、抗震可靠性分析及优化设计等方面作了系统深入的研究^[24]。

(3) 知识的不完善性。事物的系统是由若干相互联系、相互作用的事物所构成的具有特定功能的整体。人们常用颜色简单描述对系统信息掌握的完备程度,通常分为白色系统、黑色系统及灰色系统。白色系统是指信息完备的系统;黑色系统是指毫无信息的系统;灰色系统是指部分信息已知、部分信息未知的系统,信息中既有白色参数,又有黑色参数。虽然有些客观事物本身既无随机性又无模糊性,属于确定性事物,但由于主观原因(例如知识水平不足)而对该事物认识不清,或是客观原因(例如难于取得待建桥梁未来荷载的统计信息),该事物对决策者只提供了不完善或不完备的信息,但如果决策中必须使用这种信

息，就必须考虑它的不确定性，而不能把它作为确定信息来处理。目前对这种不完备的信息，还没有成熟的数学方法。

(六) 钢筋混凝土基本构件计算理论

钢筋混凝土构件在复杂受力和重复或反复荷载作用下的计算理论是相当复杂的。我国混凝土结构设计规范国家标准管理组从1992年起组织了第五批研究课题，有55个研究单位参加，取得了丰硕的成果，1996年11月于湖北荆沙市召开了成果鉴定与评议会议，出版了“混凝土结构设计规范第五批科研课题综合报告汇编”。

美籍华人学者徐增全教授提出的将力的平衡、变形协调条件和混凝土的软化应力-应变关系加以组合而形成的软化桁架理论(或称软化受压场理论)^[26]，有可能成为解决剪力传递强度、深梁、剪力墙、框架墙板、受剪、受扭构件计算的一个有效途径。国内开始用神经网络技术研究钢筋混凝土构件的受力性能。

(七) 结构功能设计

近年来，一些国外文献，如文献[29]提出了结构“功能设计”(Performance-based design)的概念。“功能”包括三个方面：

- (1) 使用性 (Serviceability)。结构在承受所考虑的作用效应时，具有合适的使用能力。
- (2) 可修性 (Restorability)。结构在承受所考虑的作用效应时，具有在技术上或经济上适于修复所出现的损伤的能力。
- (3) 安全性 (Safety)。结构在承受所有可能的作用效应时，具有保证使用者无伤亡的能力。

检验“功能”是否满足规定要求的表达式为^[29]

$$PI_R > PI_S \quad (1-1)$$

式中， PI_R 为表达所设计结构具有可靠能力(如抗弯能力、裂缝允许宽度等)的功能指标； PI_S 为表达建造期或使用期所考虑的作用效应(如弯矩、裂缝宽度等)的功能指标。

“功能设计”的概念，也用于已建结构的“功能评估”。

对应于“功能设计”的限定状态 (Limit states) 为：

- (1) 使用限定状态 (Serviceability limit states)；
- (2) 损伤控制限定状态 (Damage control limit states)；
- (3) 极限状态 (Ultimate limit states)。

这种“功能设计”的概念，与我国结构可靠性设计统一标准中所提出的结构设计应符合可靠性的要求，即：①安全性，②适用性，③耐久性的要求，以及抗震设计中“小震不坏、中震可修、大震不倒”的概念，有若干相似之处。

第四节 耐 久 性

混凝土耐久性的研究是一个重要的问题，特别是我国沿海及近海地区的混凝土结构，由于海洋环境对混凝土的腐蚀，特别是钢筋的锈蚀而造成结构的早期损坏，已成为工程中的重要问题。早期损坏的结构需要花费大量的财力进行维修补强，甚至造成停工停产的巨大

经济损失。提高混凝土耐久性的主要措施有：采用高炉矿渣水泥、优质陶粒骨料、高效减水引气剂、优质掺合料（如硅灰），选用低碱水泥、注意选择骨料，防止碱-骨料反应；保证施工质量或采用防腐涂层（环氧树脂等）。钢筋腐蚀会使构件产生顺筋裂缝、保护层剥落。防止钢筋锈蚀的主要措施是选择合理的保护层厚度，将混凝土振捣密实，并进行良好的养护。在混凝土内加入钢筋阻锈剂，如 RI-1 系列钢筋阻锈剂、DCI 等。对钢筋使用静电喷涂粉末环氧防腐涂层，阴极保护等措施，或从钢筋本身而言，研制耐蚀钢筋，都是有积极意义的。防止因钢筋锈蚀而使构件早期破坏的另一重要措施，是在钢筋锈蚀轻度发展之前即采取维修措施（如喷丙烯酸乳液砂浆封闭修补）。早期检测钢筋局部开始锈蚀的技术有：简易的拖链或锤击法（发出锤音部位表示钢筋锈蚀），测定构件表面电位图与电阻率法，远红外热图法，雷达反射图像法， γ 射线反散仪法等。后几种方法所用的仪器及方法都比较复杂。

结构的耐久性问题可分为两大类型：①待建结构耐久性设计；②已建结构耐久性的评估鉴定。

1. 待建结构耐久性设计

耐久性设计涉及到结构暴露环境、结构选材、设计、施工、养护、检查、管理、维修等多方面的条件，是一个极为复杂的问题。

1989 年 CEB（欧洲混凝土委员会）资料第 182 号“CEB 耐久混凝土结构设计指南”是一本有参考意义的文献，该指南分为 A 篇“理论基础”和 B 篇“实用建议”。在“理论基础”篇中，介绍了影响混凝土结构耐久性的主要因素及其相互关系，混凝土中气体、水及其溶解的有害物质的迁移和结合机理，以及与之有关的主要因素（孔结构和裂缝形态和混凝土表面的微气候），对混凝土中钢筋锈蚀的机理，环境的侵蚀性等都作了理论上的说明。在“实用建议”篇中，阐述了环境的暴露分级、耐久性设计、施工和维护以及过去研究甚少的建筑物的风化与褪色，还总结了防止各种特定破坏机制、防止或中断老化过程，混凝土防护、钢筋防护、环境处理（室内环境、室外环境、与土壤接触的混凝土、海洋环境、海洋生物等）、结构鉴定等。

日本土木学会 1989 年 8 月制定了“混凝土结构耐久设计准则（试行）”。该准则的基本思想是要求构件各部位的耐久指数 T 大于或等于环境指数 S 。耐久指数 T 是根据结构使用的材料、设计详图、施工条件、表面防护方法等众多因素进行评价；环境指数是根据待建结构所处环境条件及结构不需要维修的年限而决定的指数。这本准则的参数取值主要依据经验，缺少严格的定量分析，对疲劳、腐蚀性影响等也缺少规定，但也有其可借鉴之处。国际材料及结构研究所联合会（RILEM）60—CSC 技术委员会 1989 年的报告（混凝土钢筋的腐蚀），也是耐久性方面的一个有参考价值的文献。我国在耐久性设计方面，已反映在近年我国水工、港工、海工设计规范及工业建筑防腐蚀设计规范。在防止碱骨料反应方面，我国砂、石料的质量标准，特别是 1993 年混凝土碱含量限值标准（CECS53：93）的颁布，对于防止碱骨料反应而引起的混凝土开裂有重大意义。此外，“混凝土结构耐久性设计建议”也正在编制中。国家科委 1994 年组织的重大科技研究项目“重大土木与水利工程安全性与耐久性的研究”也正在开展，预期近年内关于混凝土结构耐久性设计将有重大的进展。

2. 已建结构的鉴定^[27]