

混凝土结构系列教材

混凝土结构原理

车宏亚 主编



天津大学出版社

TU37

C34

(2)

440930

混凝土结构原理

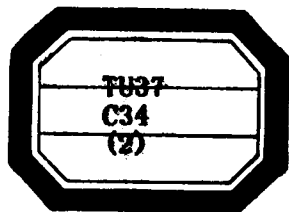
(第二版)

车宏亚 主编



00448930

5



天津大学出版社

内 容 提 要

本书系根据现行国家标准《混凝土结构设计规范》(GBJ10—89)编写的,主要内容包括钢筋混凝土材料的力学性能,基本计算原则,压、拉、弯、扭等基本构件的承载力计算,裂缝宽度与变形验算,以及预应力混凝土构件的计算等。

该书可作为大专院校工业与民用建筑和建筑结构工程专业的教材,也可供土木、水利工程设计、施工和科研工作者参考。

混凝土结构原理 (第二版)

车宏亚 主编

出版发行:天津大学出版社(电话:022-27403647)

地 址:天津市卫津路92号天津大学内(邮编:300072)

印 刷:河北省昌黎县印刷总厂

经 销:新华书店天津发行所

开 本:787mm×1092mm $1/16$

印 张:19.25

字 数:482千

版 次:1990年5月第1版

1999年1月第2版

印 次:1999年1月第1次

印 数:001-4000

书 号:ISBN7-5618-1123-3/TU·136

定 价:22.00元

如有印装质量问题,请与本社发行部门联系调换。

第一版前言

本书系根据高等工业院校工业与民用建筑专业和建筑结构工程专业教学大纲的要求编写的。内容包括:钢筋混凝土结构材料的力学性能,基本计算原则,以及弯、剪、扭、压、拉和预应力混凝土等构件的计算理论和构造要求。

全书是按照我国新编国家标准《混凝土结构设计规范》(GBJ10—89)编写的,因此,在计算体系、设计方法、计量单位和符号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,书中适度引用了国内外一些先进科学技术成果。

参加本书编写的有:陈云霞(绪论、第一章),储彭年(第二章),车宏亚、李维溥(第三章),吴智眉(第四章),康谷贻(第五章),曹祖同(第六、七章),王玉起(第八章),姚崇德(第九章)。插图由谢荔描绘。全书由车宏亚主编,于庆荣、戴自强主审。

限于编者业务水平,特别是由于执笔者众,在文字及风格的统一方面尚感不足,书中不妥甚至错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1989 年 2 月

第二版前言

本书第一版 1990 年 3 月由天津大学出版社出版,主要作为工业与民用建筑和建筑结构专业的教材。到 1995 年 11 月已先后印刷七次。1994 年曾获天津大学第二届优秀教材一等奖。

1993 年 7 月和 1997 年 1 月建设部曾先后颁布施行《混凝土结构设计规范》(GBJ10—89)两项“局部修订条文”,为了尽快实施新的规范,也为了及时反映我国近几年混凝土结构的最新发展,我们在本版中补充了不少内容,对全书进行了必要的修订。

本书内容包括:钢筋混凝土结构材料的力学性能,基本计算原则,以及弯、剪、扭、压、拉和预应力混凝土基本构件的计算原理和一般构造要求。

参加本书编写的有:陈云霞(绪论、第一章),储彭年、王铁成(第二章),车宏亚、李维溥(第三章),吴智眉(第四章),康谷贻(第五章),曹祖同、杨建江(第六、七章),王玉起(第八章),姚崇德、杨建江(第九章)。全书由车宏亚主编,杨建江校订。

鉴于“混凝土结构”的涵义,泛指钢筋混凝土结构与预应力混凝土结构,已被广大读者所认同,故第二版将书名改为《混凝土结构原理》。

限于编者业务水平,书中不妥或错误之处在所难免,恳请读者予以批评指正。

编 者

1996 年 6 月

目 录

绪论	(1)
0.1 钢筋混凝土的一般概念及特点	(1)
0.2 混凝土结构的发展简况及其应用	(2)
0.3 我国混凝土结构的发展	(5)
第一章 钢筋混凝土材料的力学性能	(9)
1.1 钢筋	(9)
1.2 混凝土	(15)
1.3 钢筋与混凝土之间的粘结	(33)
第二章 钢筋混凝土结构基本计算原则	(42)
2.1 概述	(42)
2.2 概率极限状态设计方法	(43)
2.3 我国现行混凝土结构设计规范所采用的设计表达式	(52)
2.4 荷载的分类及其标准值	(56)
2.5 材料强度的标准值与设计值	(57)
第三章 受弯构件正截面的承载力计算	(60)
3.1 试验研究分析	(60)
3.2 正截面受弯承载力的一般计算方法	(66)
3.3 单筋矩形截面受弯构件的承载力计算与截面构造	(71)
3.4 双筋矩形截面受弯构件的承载力计算	(81)
3.5 T形截面受弯构件的承载力计算	(88)
3.6 受弯构件截面延性	(97)
第四章 受弯构件斜截面承载力计算	(100)
4.1 概述	(100)
4.2 无腹筋梁斜裂缝出现后的受力状态	(101)
4.3 斜截面破坏的主要形态	(101)
4.4 影响梁斜截面承载力的主要因素	(102)
4.5 无腹筋梁斜截面承载力	(104)
4.6 有腹筋简支梁的抗剪性能	(105)
4.7 有腹筋连续梁的抗剪性能	(109)
4.8 斜截面承载力的设计步骤	(111)
4.9 构造要求	(115)
第五章 受扭构件扭曲截面承载力计算	(121)
5.1 概述	(121)
5.2 纯扭构件的试验研究	(121)

5.3	纯扭构件的扭曲截面承载力	(123)
5.4	弯剪扭构件的扭曲截面承载力	(131)
第六章	受压构件的承载力计算	(141)
6.1	轴心受压构件的正截面承载力计算	(142)
6.2	偏心受压构件的承载力计算	(150)
6.3	双向偏心受压构件正截面承载力计算	(189)
6.4	受压构件的构造要求	(192)
第七章	受拉构件的正截面承载力计算	(196)
7.1	轴心受拉构件的正轴面承载力计算	(196)
7.2	偏心受拉构件的正截面承载力计算	(196)
7.3	偏心受拉构件的斜截面承载力计算	(198)
第八章	钢筋混凝土构件抗裂、变形和裂缝宽度计算	(201)
8.1	变形和裂缝极限状态的限值规定	(201)
8.2	抗裂度计算	(203)
8.3	受弯构件的变形计算	(209)
8.4	裂缝宽度计算	(221)
第九章	预应力混凝土构件的计算	(231)
9.1	概述	(231)
9.2	张拉方法和锚具	(235)
9.3	预应力混凝土所用的材料	(238)
9.4	控制应力和预应力损失	(239)
9.5	预应力混凝土构件的计算	(254)
9.6	轴心受拉构件	(257)
9.7	受弯构件	(262)
9.8	构造要求	(282)
9.9	无粘结预应力混凝土弯构件简介	(287)
9.10	其它类型预应力混凝土构件	(288)
附表		(291)

绪 论

0.1 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 0-1a、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,一根为素混凝土梁,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 0-1a),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 0-1c 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。

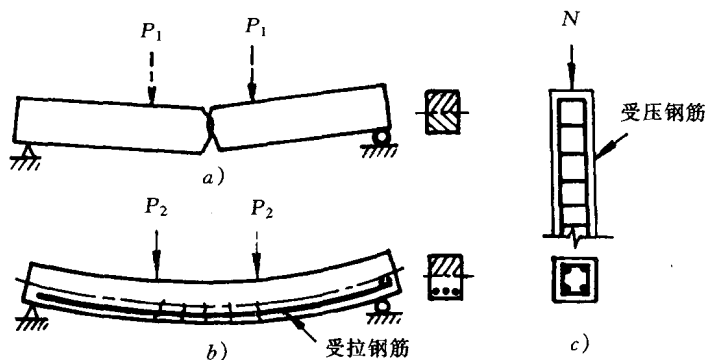


图 0-1 简支梁受力破坏图示

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,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,不像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。若有足够厚度的保护层,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的整体破坏。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,还可以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,所以在国内外的工程建设中均得到广泛应用。

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;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;建造较为费工,现浇结构模板需耗用较多的木材;施工受到季节气候条件的限制,补强修复较困难;隔热隔声性能较差等。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。不过随着人们对于钢筋混凝土这门学科科研认识的不断提高,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。

0.2 混凝土结构的发展简况及其应用

钢筋混凝土是在 19 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 19 世纪末,随着生产及建设的发展需要,钢筋混凝土的试验工作、计算理论、材料及施工技术均得到了较快的发展。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。这些均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,许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

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,而且在一些方面,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安全。对防腐蚀有特殊要求的海洋结构(如采油平台),也必须采用预应力混凝土或钢筋混凝土建造。

为改善钢筋混凝土自重大的缺点,世界各国已经大力研究发展了各种轻质混凝土(由胶结料、多孔粗骨科、多孔或密实的细骨科与水拌制而成,其重度一般不大于 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,其重度一般为 $14\text{kN/m}^3 \sim 18\text{kN/m}^3$ 。国内常用的强度等级为 C20、C30,也可配制 C40 或更高的强度,其重度一般为 $12\text{kN/m}^3 \sim 18\text{kN/m}^3$ 。由轻混凝土制成的结构自重较普通混凝土可减少 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(香港中环大厦)达 78 层 374m;最高的全部轻混凝土结构的高层建筑(休斯敦贝壳广场大厦)52 层 215m;预应力轻骨科混凝土建造的飞机库(前西德)房盖结构跨度达 90m;预应力混凝土箱形截面桥梁跨度已达 240m 以上(日本滨名大桥);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,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。实验证明,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 年代前苏联最先制定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,即把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和经验分项确定,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(JCSS),通过广泛的国际合作,于 1976 年编制了按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 年加拿大制定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指出,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,改进现有计算方法中,注重了在实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,有时又将这两种情况统称为“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,能更好地控制裂缝与挠度,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。

0.3 我国混凝土结构的发展

在19世纪末20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,建筑数量也很少。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得到迅速的发展和广泛的应用。

我国在一般民用建筑中已较广泛地采用定型化、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、南京等城市已大批兴建,目前很多城市已在推广。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1996年为止,已建成和在建的100m以上的钢筋混凝土高层建筑就有222幢。如北京中央彩色电视台中心(9° 抗震设防,筒中筒结构,高135m,27层)、深圳国贸大厦(框架—筒体结构,高160m,50层)、上海商城主楼(框架—剪力墙结构,高165m,48层)、深圳亚洲大酒店(巨型框架结构,高114m,37层)、青岛中银大厦(筒中筒结构,高241m,58层),其中最高的建筑是广州的中天广场,采用框架—筒体结构,高度已达322m,地上80层,地下2层。随着高层建筑业的发展,高层建筑结构的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及施工规定》(JZ102—79)后,1990 年又制订了新的《钢筋混凝土高层建筑结构设计及施工规程》(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钢架结构体系外,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;马鞍形壳板屋盖结构体系等。钢筋混凝土离心管结构是 60 年代开始发展起来的一种轻型承重结构,在我国已有很多省市推广应用,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,近年来研究的由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,已在一些地区的厂房、地下结构及高层建筑中采用,并在总结设计施工经验及科研成果的基础上,于 1990 年制定了《钢管混凝土结构设计与施工规程》(CECS 28—29)。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,所以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 年和 1992 年相继建成了相当于 9°抗震设防的天津电视塔和北京中央电视塔,其高度分别达到 415.2m 和 396m,而 1995 年建成高 460m 的上海电视塔,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 1989 年,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,1986 年建成长江干流上的葛洲坝水利枢纽工程,其发电能力为 271.5 万 kW,水库容量 15.8 亿 m³,整个工程混凝土用量达 983 万 m³。还有 1989 年建成的龙羊峡水电站,装机容量 128 万 kW,其混凝土重力拱坝高

178m, 坝的总库容 247 亿 m^3 。目前正在兴建的长江三峡水利枢纽工程, 大坝高 186m, 总库容 393 亿 m^3 , 坝体混凝土用量达 1 527 万 m^3 。三峡水电站将装有 26 台 70 万千瓦的水轮发电机组, 装机容量 1 786 万 kW。2009 年建成的长江三峡水电站将成为世界上最大的水力发电站。

钢筋混凝土和预应力混凝土桥梁也有很大的发展, 如著名的长江大桥引桥, 福建乌龙江大桥, 最大跨度达 144m, 全长 548m。四川泸州大桥, 采用了预应力混凝土 T 形结构, 三个主跨为 170m, 主桥全长 1 255.6m, 引道长达 7 000m。近年来, 我国还建造了钢筋混凝土或预应力混凝土斜拉桥, 在济南黄河公路桥、天津永和桥建成后, 又相继建造了武汉长江第二桥、安徽铜陵桥和重庆长江桥等, 它们的主跨已分别达到 400m、432m 和 444m。90 年代建成的著名上海南浦及杨浦大桥, 是组合式斜拉桥, 其主跨已分别达到 423m 和 602m。

我国公路斜拉桥的建造和设计均已进入国际先进行列。

为改善城市交通拥挤现状, 城市道路立交桥也在迅速发展。

随着钢筋混凝土和预应力混凝土结构在工程建设中的大量应用, 我国在钢筋混凝土和预应力混凝土方面的科学研究工作也有了较大的发展。近年来, 在钢筋混凝土基本理论与设计方法、可靠度与荷载分析、单层与多层厂房结构、大板与升板结构、大跨度特种结构、工业化建筑体系、结构抗震、以及有限元方法、电子计算机在钢筋混凝土结构中的应用和现代化测试技术等方面的研究工作都取得了很多新的成果, 基本理论和设计工作的水平有了很大提高, 某些方面已达到或接近国际水平。

作为反映我国混凝土结构学科水平的混凝土结构设计规范也随着工程建设经验的积累、科研工作的成果和世界范围技术的进步而不断改进。解放初期东北地区首先颁布的《建筑结构设计暂行标准》以及 1955 年制定的《钢筋混凝土结构设计暂行规范》(规结 6—55) 采用了当时苏联规范中的按破坏阶段设计法。50 年代末我国开始着手编制自己的建筑结构设计规范, 并于 1966 年颁布了第一本《钢筋混凝土结构设计规范》(BJG21—66), 采用了当时较为进步的以多系数表达的极限状态设计法。1970 年以后在总结建国以来工程实践经验和科学研究成果的基础上, 于 1974 年编制了采用单一安全系数表达的极限状态设计法的《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ10—74), 以及一些有关的专门规程和规定。这些对于保证工程质量、统一设计标准、节约材料起到了重要的作用, 规范(BJG21—66)和(TJ10—74)的颁布标志着我国混凝土结构设计规范步入了从无到有、由低向高发展的阶段。为了解决各类材料的建筑结构可靠度设计方法的合理和统一问题, 组织了有关高等院校、科研、设计单位对荷载、材料性能及构件几何尺寸等设计基本变量进行了大量的实测统计, 认真借鉴了国外先进经验和国际标准, 于 1984 年颁布了《建筑结构设计统一标准》(GBJ68—84) 规定我国各种建筑结构设计规范均统一采用以概率理论为基础的极限状态设计方法, 其特点是以结构功能的失效概率作为结构可靠度的量度, 由定值的极限状态概念转变到非定值的极限状态概念上, 从而把我国结构可靠度设计方法提高到当前的国际水平, 对提高结构设计的合理性具有深刻意义。与此同时, 钢筋混凝土结构设计规范组在(TJ10—74)规范颁布后, 及时针对该规范修订中的遗留问题, 按国际先进标准, 组织全国有关高等院校、科研与设计单位统一计划, 开展了三批共 38 项专题研究, 完成各种类型试件试验两万多个, 比较深入地掌握了各类简单和复合受力状态下的强度和变形规律, 提高了我国混凝土结构领域的学术水平, 为修订新规范打下了坚实的基础。从 1982 年起对原规范(TJ10—74)进行了全面的系统的修订。现行的《混凝土结构设计规范》(GBJ10—89)[本书以下简称《规范》(GBJ10—89)]于 1990 年颁布施行, 并于 1993 年、1996 年根据发展

1

公布了二个《规范》(GBJ10—89)局部修订条文。现行规范遵照《建筑结构设计统一标准》(GBJ68—84)采用了以概率理论为基础的极限状态设计方法;建立了构件正截面承载力计算体系,对复合力作用下的构件截面承载力计算做了较大的补充和配套工作;进一步完善了构造要求;增加了结构构件抗震设计以及剪力墙、深梁等构件的设计。现行的《规范》(GBJ10—89)较原规范(TJ10—74)大大丰富了内容,有了很多实质性的突破,使我国混凝土结构设计规范提高到了一个新的高度。

第一章 钢筋混凝土材料的力学性能

要掌握钢筋混凝土这种复合材料所制成结构的计算理论及设计方法,必须很好地认识钢筋混凝土结构构件在各种受力条件下的性能,为此,首先需对钢筋及混凝土材料各自的力学性能及其共同工作具备一定的基础知识。

1.1 钢 筋

1.1.1 钢筋的强度与变形

钢筋的强度和变形性能可通过拉伸试验得到的应力应变曲线来说明。钢筋的应力应变曲线,有的有明显的流幅(如图 1-1),例如热轧低碳钢和普通热轧低合金钢所制成的钢筋;有的则没有明显的流幅(如图 1-2),例如高碳钢制成的钢筋。

从有明显流幅钢筋的典型应力应变曲线中可以看出,应力值在 A 点以前,应力与应变按比例增加,A 点对应的应力称为比例极限。过 A 点以后,应变较应力增长为快,到达 B'点后钢筋开始塑流,B'点称为屈服上限,它与加载速度、断面形式、试件表面光洁度等因素有关,故 B'点是不稳定的。待 B'降至屈服下限 B 点,这时应力不增加而应变急剧增加,图形接近水平

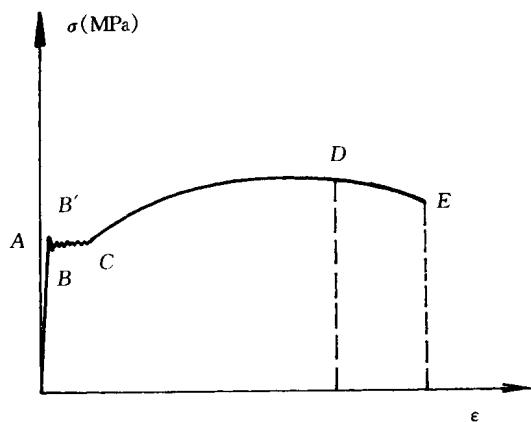


图 1-1 有明显流幅钢筋的应力应变图

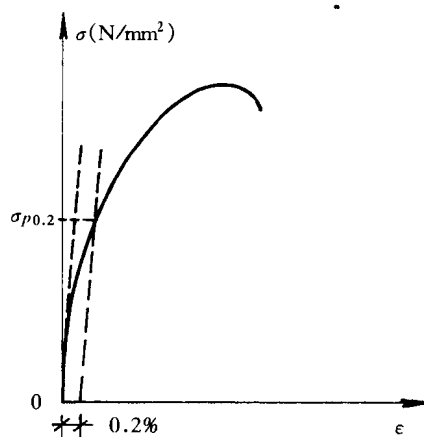


图 1-2 没有明显流幅钢筋的应力应变图

线,至 C 点。B 点到 C 点的水平距离的大小称为流幅或屈服台阶。有明显流幅的热轧钢筋屈服强度是以屈服下限为依据的。过 C 点以后,应力又继续上升,说明钢筋又提高了抗拉能力,随着曲线上升到达最高点 D,相应的应力称为钢筋的极限强度,CD 段称为钢筋的强化阶段。过了 D 点以后,这个试件在薄弱处的截面将突然显著缩小,发生局部颈缩现象,变形迅速增加,应力随之下降,达到 E 点试件就被拉断。

计算钢筋结构构件时,对于有明显流幅的钢筋取国家标准规定的屈服点作为设计强度的依据。这是因为构件中钢筋的应力到达屈服点后,将产生很大的塑性变形,这时钢筋混凝土构件将出现很大的变形和不可闭合的裂缝,以致不能使用。对没有明显流幅或屈服点的钢筋(图 1-2),国家标准取规定非比例伸长率为 0.2% 时的应力 $\sigma_{p0.2}$ 作为条件屈服点。《混凝土结构设计规范》(GBJ10—89),新近修订条文中规定在构件承载力设计时取用 $0.8\sigma_b$ (σ_b 为极限抗拉强度)作为设计上取用的条件屈服点。

钢筋除需有足够的强度外,还应具有一定的塑性变形能力,钢筋的塑性通常用伸长率和冷弯性能两个指标衡量。钢筋拉断后(例如图 1-1 中的 E 点)的伸长值与原长的比率称为伸长率。伸长率越大塑性越好;冷弯是将直径为 d 的钢筋绕直径为 D 的弯芯弯曲到规定的角度而无裂纹断裂及起层现象,则表示合格。弯芯的直径 D 越小,弯转角越大,则说明钢筋的塑性越好。

为了使钢筋在拉断前有足够的伸长,能给出构件即将破坏的预兆,并且使钢筋在加工成型时不发生断裂,亦即保证钢筋具有一定的塑性,国家标准规定了各种钢筋所必须达到的伸长率的最小值(用 δ_{100} 、 δ_{10} 和 δ_5 分别表示标距 $l=100d$ 、 $l=10d$ 和 $l=5d$ 时的伸长率)以及相应的冷弯试验要求(弯芯直径及弯转角),见表 1-1。

各种钢筋伸长率及冷弯试验要求

表 1-1

钢筋级别	公称直径 $d(\text{mm})$	伸长率 (%)			冷弯要求	
		σ_5	σ_{10}	σ_{100}	冷弯角度	弯芯直径(D)
I 级	8~20	25	—	—	180°	1d
II 级	8~25	18	—	—	180°	3d
	28~40	18	—	—	180°	4d
III 级	8~25	14	—	—	90°	3d
	28~40	14	—	—	90°	4d
IV 级	10~25	10	—	—	90°	5d
	28~32	10	—	—	90°	6d
冷拉 I 级	≤ 12	—	11	—	180°	3d
冷拉 II 级	≤ 25	—	10	—	90°	3d
	28~40	—	10	—	90°	4d
冷拉 III 级	8~40	—	8	—	90°	5d
冷拉 IV 级	10~28	—	6	—	90°	5d
冷轧带肋	LL550	4~12	—	—	180°	3d
	LL650	4~12	—	4	180°	4d
	LL800	4~12	—	4	180°	5d
热处理钢筋	6~10	—	6	—	—	—

1.1.2 钢筋的成分、级别、品种

钢筋混凝土结构所采用的钢材按其化学成分,可分为碳素钢及普通低合金钢。碳素钢除含有铁元素外还含有少量的碳、硅、锰、硫、磷等元素。根据含碳量的多少,碳素钢又可分为低碳钢(含碳量 $<0.25\%$)、中碳钢(含碳量 $0.25\% \sim 0.6\%$)及高碳钢(含碳量 $0.6\% \sim 1.4\%$),含碳量越高强度越高,但塑性和可焊性降低,反之则强度降低而塑性和可焊性好。普通低合金钢