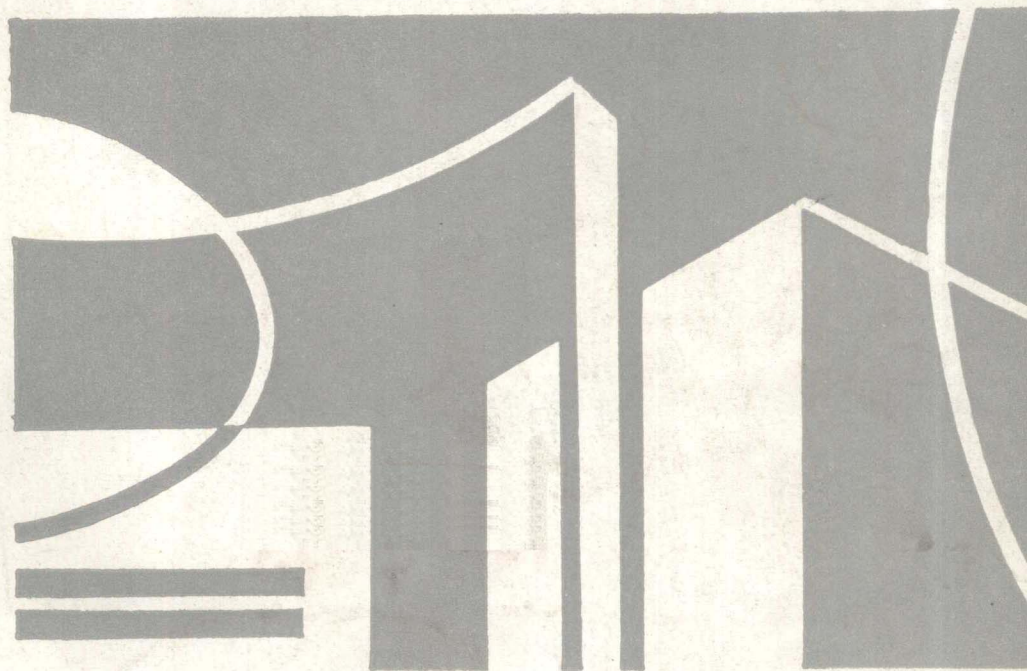


中等专业学校试用教材

给水排水 工程结构

杨禹门 贺力民 编



中国建筑工业出版社

中等专业学校试用教材

给水排水工程结构

杨禹门 贺力民 编

中国建筑工业出版社

前 言

本书是中等专业学校给水排水专业试用教材，是根据建设部颁发的给水排水工程结构教学大纲编写而成。

本书共十章，包括钢筋混凝土结构和砌体结构两部分。钢筋混凝土结构包括钢筋混凝土材料的力学性能，概率极限状态设计法、受弯、受压和受拉构件承载力计算，裂缝和变形计算，梁板结构以及水池和管道。砌体结构包括砌体强度，受压、受拉、受弯、受剪和局部受压承载力计算以及砖壁水池和混合结构管道。

本书内容是根据《建筑结构设计统一标准》（GBJ68—84），《混凝土结构设计规范》（GBJ10—89）、《砌体结构设计规范》（GBJ3—88）和《给水排水工程结构设计规范》（GB69—84）编写的。

编写时，注重力学概念和构造知识，注重实用，但力求通俗易懂，避免繁琐的论证。为了便于搞清基本概念和基本方法，本书附有较多的例题，每章均附有小结、思考题及习题。

本书由衡阳铁路工程学校杨禹门主编。绪言、第一、二、四、七、八和十章由杨禹门编写，第三、五、六和九章由北京城市建设学校贺力民编写。本书由北京市政设计研究院教授级高级工程师沈世杰主审，在此表示感谢。

由于水平所限，不妥或错误之处，欢迎批评指正。

目 录

绪言	1
第一章 钢筋混凝土材料的力学性能	4
1-1 钢筋	4
1-2 混凝土	7
1-3 钢筋与混凝土之间的粘结力	12
第二章 概率极限状态设计法	16
2-1 结构的功能和极限状态	16
2-2 极限状态设计法	17
2-3 极限状态设计表达式	19
第三章 钢筋混凝土受弯构件正截面承载力计算	23
3-1 梁、板的一般构造	23
3-2 受弯构件正截面承载力试验结果分析	26
3-3 单筋矩形截面受弯构件	28
3-4 双筋矩形截面梁	37
3-5 T形截面受弯构件	41
第四章 钢筋混凝土受弯构件斜截面承载力计算	49
4-1 概述	49
4-2 斜截面的破坏形态	50
4-3 斜截面受剪承载力计算	51
4-4 保证斜截面受弯承载力的构造措施	57
4-5 箍筋及弯起钢筋的其他构造要求	61
第五章 钢筋混凝土受压构件承载力计算	72
5-1 轴心受压构件	72
5-2 偏心受压构件正截面承载力计算	76
第六章 钢筋混凝土受拉构件承载力计算	93
6-1 轴心受拉构件承载力计算	93
6-2 偏心受拉构件正截面承载力计算	94
第七章 钢筋混凝土构件的裂缝和变形计算	99
7-1 概述	99
7-2 抗裂度计算	100
7-3 裂缝宽度的计算	102
7-4 受弯构件的变形计算	109
第八章 钢筋混凝土梁板结构	117
8-1 梁板结构的类型	117
8-2 整体式单向板肋形顶盖	118

8-3	双向板	143
8-4	圆形平板	147
8-5	整体式无梁顶盖	159
8-6	装配式梁板结构	167
8-7	板上开孔的处理	171
第九章 水池和管道		177
9-1	概述	177
9-2	水池的荷载和计算内容	179
9-3	钢筋混凝土圆形水池	183
9-4	钢筋混凝土矩形水池	192
9-5	管道	204
9-6	预应力混凝土圆形水池和水管	210
第十章 砌体结构		216
10-1	概述	216
10-2	砌体的强度	217
10-3	砌体结构的设计原则	221
10-4	受压构件的承载力计算	222
10-5	轴心受拉、受弯和受剪构件的承载力计算	231
10-6	砌体局部受压承载力计算	232
10-7	墙、柱高厚比验算	236
10-8	砖壁水池	237
10-9	混合结构矩形管道	244
附录		252
附录2-1	混凝土强度标准值和设计值 (N/mm^2)	252
附录2-2	混凝土弹性模量 E_c (N/mm^2)	252
附录2-3	钢筋强度标准值和设计值 (N/mm^2)	253
附录2-4	钢筋弹性模量 (N/mm^2)	254
附录3-1	混凝土保护层最小厚度 (mm)	254
附录3-2	混凝土构件中纵向受力钢筋的最小配筋百分率 (%)	254
附录3-3	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	255
附录3-4	钢筋的计算截面面积及理论重量	256
附录3-5	每米板宽内各种钢筋间距时的钢筋截面面积	257
附录8-1	按弹性法计算时梁、板的计算跨度	258
附录8-2	均布荷载及集中荷载作用下等跨连续梁的弯矩和剪力系数	258
附录8-3	矩形板在分布荷载作用下静力计算表	264
附录8-4	圆形平板的弯矩系数 ($\mu = \frac{1}{6}$)	268
附录8-5	边缘固定有中心支柱圆板在均布荷载作用下的弯矩系数	268
附录8-6	边缘铰支有中心支柱圆板在均布荷载作用下的弯矩系数	269
附录8-7	边缘铰支有中心支柱圆板在边缘均布力矩作用下的弯矩系数	269
附录8-8	有中心支柱圆板的中心支柱荷载系数 K_c 及圆板抗弯刚度系数 k	269
附录9-1	圆形水池池壁内力系数表	270

绪 言

一、《给水排水工程结构》课的任务

建筑物或构筑物中支承荷载而起骨架作用的部分（平面或空间体系）叫做结构。这种结构在房屋建筑中称为建筑结构，在给水排水工程中称为给水排水工程结构。

给水排水工程常用的构筑物有水池、水塔、取水井、沟渠、管道、检查井等，《给水排水工程结构》这门课所讨论的就是这些构筑物（含建筑物，如泵房等）的结构设计问题。

一项给水排水工程或者某一构筑物的建造，通常要经过勘察、设计和施工三个阶段，其中设计一般包括工艺设计、建筑设计、结构设计和设备设计四个方面。

结构设计的基本知识对于工艺设计人员来说无疑是很重要的，因为只有掌握了结构知识，才能配合工艺设计选用合适的构筑物。结构设计的基本知识对于施工人员来说也是必不可少的，因为只有懂得结构设计的原理和方法，了解结构的构造要求，即具备较为完整的结构设计知识，才能看懂结构设计图，理解设计的意图，从而确定施工工艺，才能正确处理施工中的结构问题。

二、钢筋混凝土结构和砌体结构的特点

大量的构筑物和建筑物是由钢筋混凝土筑成的或者由砖石砌成的。

钢筋混凝土是由两种力学性能不同的材料——钢筋和混凝土结合而成的一种复合材料。混凝土具有较高的抗压强度，但是抗拉强度比抗压强度低很多，因此素混凝土梁在不大的荷载作用下就会由于受拉区断裂而破坏（图0-1a），这时混凝土的抗压强度远远没有得到利用。如果在梁中受拉区沿拉应力方向配置钢筋，形成钢筋混凝土梁（图0-1b），虽然当荷载增大到一定程度，受拉区混凝土会出现裂缝，但是钢筋可以代替混凝土承受拉力，使梁的承载能力得到很大的提高。如果配筋适当，则两种材料的强度就会得到充分利用。

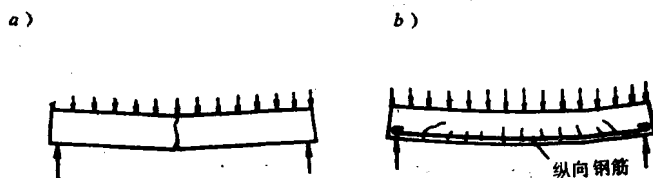


图 0-1 素混凝土梁及钢筋混凝土梁

钢筋和混凝土两种性质不同的材料之所以能共同工作，是因为钢筋和混凝土之间有很好的粘结力，使两者能牢靠地粘结在一起，在荷载作用下，它们之间不产生相对的滑移而能整体工作；其次是两者的温度线膨胀系数几乎相等，在温度变化时不致因线性胀缩不同而破坏两者的整体性；同时混凝土还能很好地保护钢筋免于锈蚀，增加了结构的耐久性，

使结构始终保持整体工作。

钢筋混凝土结构具有下列特点：

- 1.取材方便 混凝土中占比例较大的砂、石材料均系地方性材料，均可就地选用；用量比钢结构少得多，且钢筋运输也比较方便。
- 2.耐久性较好 钢筋混凝土结构在正常设计、施工和使用条件下，具有较好的耐久性，不需要专门的维修。
- 3.整体性较好 现浇钢筋混凝土结构整体性好，具有良好的抗震性。
- 4.可模性好 钢筋混凝土可以根据需要浇筑成各种形状和尺寸。
- 5.抗渗性、抗冻性和耐火性均较好。

由于钢筋混凝土结构具有这些特点，所以在给水排水工程中得到广泛的应用。但是钢筋混凝土结构也存在着一些缺点，如自重大，抗裂性较差，建造耗费模板，施工受季节条件的限制等。随着科学技术的发展，钢筋混凝土结构的这些缺点正在逐步得到克服和改善。例如采用轻质高强混凝土可以减轻自重；采用预应力混凝土可提高构件的抗裂性；采用预制装配式构件可以节约模板，加快施工速度，并且不受季节气候的影响；采用工具式模板可以降低木材消耗等。

砌体结构与钢筋混凝土结构比较，突出的优点是能充分利用地方材料，节约木材和钢材，而且施工方法比较简单。但是它的强度较低，对于温度应力、地基不均匀沉降及地震作用比较敏感，容易出现裂缝，而且抗渗漏能力较差，必须采用专门的防水措施。正是这些缺点使得砌体结构在给水排水工程中的应用受到一定的限制。

用砖砌筑水池池壁有时可以在水平灰缝内配置钢筋或在砌体内设置钢筋带的办法来提高砌体的抗拉强度。

三、本课程的特点

本课程的主要先导课是工程力学课。工程力学讨论构件计算的基本理论、方法以及结构内力和变形的计算方法，这些知识是学习工程结构的基础。但是工程力学是研究单一、匀质、连续、弹性材料的构件，而钢筋混凝土结构则是研究由两种材料组成的构件，而且混凝土是非匀质、非连续、非弹性材料，因此工程力学中所导出的计算构件的公式不能直接应用，但是它所采用的解决问题的一般方法，如通过几何、物理和平衡条件建立基本方程的途径，对于钢筋混凝土结构仍是适用的，仅仅在具体内容上需要考虑钢筋混凝土的性质和受力特点。为此，我们在学习钢筋混凝土结构时，要复习有关的工程力学知识，并且注意它们的异同，从而加深对钢筋混凝土结构理论的理解。

工程力学侧重于应力分析和变形计算，它的解答往往是唯一的，但钢筋混凝土结构课程要解决的不仅仅是强度和变形计算问题，而主要是结构构件的设计，包括方案、截面型式和材料的选择、配筋构造等。结构设计是一个综合问题，它的解答不是唯一的，往往需要进行适用、材料用量、造价、施工等各项指标的综合分析比较才能做出合理的选择。

钢筋混凝土结构涉及面较广，综合性较强。对于讨论的问题，往往既要进行实验研究，又要进行理论分析，有时还引进工程实践经验；同是一种受力构件，不同形状有不同的计算公式，所有计算公式都有一定的限制条件；解决一个构件的设计问题，往往涉及几章内容，它们又互相联系，研究前面的问题不免要涉及后面的内容才能讨论。此外，字符也十分繁杂，有英文字母，有希腊字母，还有习惯记号。学习本课程的难点主要在于内容

多，抓不住重点，概念多不易理解，公式、符号和构造规定多而不易记住。

鉴于上述特点，学习时必须反复阅读教材，一一搞清基本概念，并及时记住基本应力图形、基本公式和主要规定；要注意前后联系，比较异同，做到举一反三，着重培养自己对问题的综合分析和归纳能力。

本门课程包括钢筋混凝土结构和砌体结构两大部分，每一部分都有基本构件和构筑物（水池和管道）两大内容。钢筋混凝土结构和砌体结构的基本构件是分别根据《混凝土结构设计规范》（GBJ10—89）和《砌体结构设计规范》（GBJ3—88）编写的，构筑物部分则是根据《给水排水工程结构设计规范》（GBJ69—84）编写的。设计规范是设计人员从事设计工作所必须遵守的共同准则，我们必须理解和熟悉这些规范，学会正确使用这些规范。

第一章 钢筋混凝土材料的力学性能

钢筋和混凝土这两种材料的力学性能以及它们的共同工作特性，是学习钢筋混凝土结构理论所必须具备的基础知识。钢筋混凝土结构的计算理论、计算方法和构造措施都是以这两种材料所具有的力学性能为依据的。《建筑材料》课已经介绍了一些有关钢筋和混凝土力学性能的知识，这里要给予必要的复习与补充。

1-1 钢 筋

一、钢筋的成分、性能、品种和级别

钢筋的钢材按化学成分可分为碳素钢和普通低合金钢两类。碳素钢除含铁元素外，还含有少量碳、硅、锰、磷、硫等元素。含碳量对钢材的力学性能有很大的影响，含碳量高，强度高，但质地较硬脆。含碳量少于0.25%的称为低碳钢或软钢，含碳量在0.6~1.4%的称为高碳钢或硬钢。普通低合金钢除含有碳素钢的元素外，还加入少量的合金元素，如锰、硅、钛、钒等。

软钢的应力应变曲线如图1-1所示。在 a 点以前，应力应变为直线关系，材料处于弹性阶段， a 点的应力称为比例极限；应力达到 c 点，钢筋开始流动， c 点应力称为屈服强度；以后应力应变曲线显示出一个水平段 cf ，称为屈服台阶或流幅；过 f 点以后，进入强化阶段，应力应变表现为上升的曲线，到达 d 点后，钢筋产生颈缩现象，应力开始下降，但应变仍能增长，直到 e 点钢筋在较为薄弱部位被拉断。相应于 d 点的钢筋应力称为极限抗拉强度。

在钢筋混凝土构件计算中，一般取屈服强度作为钢筋的强度限值（强度标准值）。这是因为当钢筋应力达屈服强度以后，将产生很大的塑性变形，而且在卸荷时这部分变形不可能恢复，这将使构件出现很大的变形和不可闭合的裂缝，以致不能使用。

高碳钢没有明显的流幅（图1-2），它的强度一般比低碳钢为高，但伸长率大为减少，它的塑性性能较差。通常取相应于残余应变为0.2%的应力 $\sigma_{0.2}$ 作为没有明显流幅钢筋的条件屈服强度。由试验得知， $\sigma_{0.2}$ 大致相当于钢筋极限强度 σ_b 的0.8倍。

与 e 点对应的应变值，反映钢筋的塑性变形程度，称伸长率。塑性好的钢筋伸长率大，能给出拉断前的预告；塑性差的钢筋伸长率小，破坏无预兆，具有脆性的特征。为了保证构件破坏前有足够的预兆，选择钢筋品种需要考虑强度和塑性两个方面的要求。

反映钢筋塑性性能的另一个指标是冷弯。冷弯就是检验钢筋绕一钢辊能弯多大角度而不断裂（图1-3）。钢辊直径越小，弯转角越大，钢筋的塑性就越好。

我国目前钢筋混凝土和预应力混凝土结构中常用的钢筋有热轧钢筋、冷拉热轧钢筋、热处理钢筋和钢丝四大类。热轧钢筋属于软钢，是由钢铁厂直接热轧成型的。热轧钢筋按其强度大小分为I、II、III和IV级，分别以 ϕ 、 Φ 、 Φ 和 Φ 表示。I级热轧钢筋属低碳

钢，其余属普通低合金钢。图1-4为不同级别钢筋应力应变的大致图形。钢筋混凝土结构常选用 I、II 或 III 级钢筋。钢丝和热处理钢筋属于硬钢，常用作预应力钢筋。

钢丝包括光面钢丝、刻痕钢丝、钢绞线和冷拔低碳钢丝。热处理钢筋是由 IV 级热轧钢筋经过淬火和回火处理后制成。经过淬火和回火的钢筋，其强度将大幅度提高，而塑性降低不多。

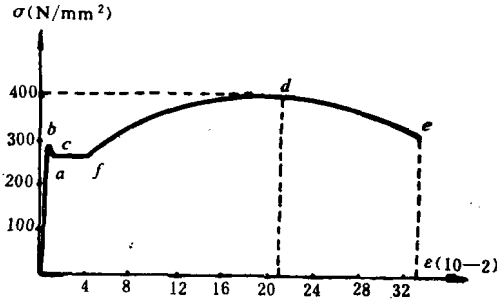


图 1-1 软钢应力应变曲线

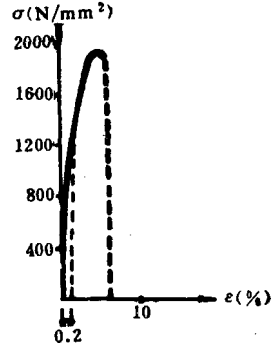


图 1-2 硬钢应力应变曲线

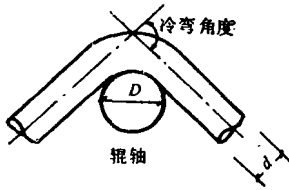


图 1-3 冷弯角度

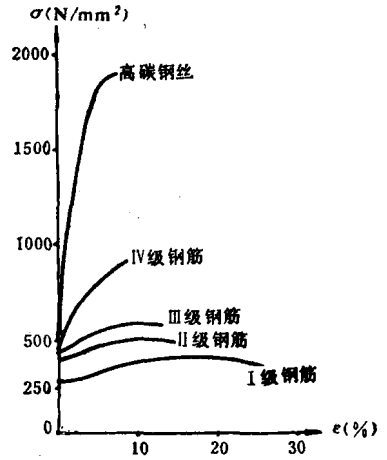


图 1-4 各级钢筋应力应变图

钢筋按其外形特征可分为光面钢筋和变形钢筋两类。I 级钢筋是光面钢筋，其余 II、III 和 IV 级都是变形钢筋。变形钢筋有人字纹和螺旋纹，近几年又生产了月牙纹（图1-5），

a)

b)



图 1-5 变形钢筋的外形

a) 月牙纹；b) 螺旋

新型月牙纹钢筋目前正在广泛使用。

表1-1示热轧钢筋的技术标准，表中“20锰硅”，20指钢内平均含碳量为万分之二十，锰硅指其主要合金元素。变形钢筋的直径以“公称直径”计，“公称直径”相当于横截面面积相等的光圆钢筋的直径。

热轧钢筋技术标准

表 1-1

项次	强度等级	钢号	直径 (mm)	外形	符号	屈服强度	极限抗拉强度	伸长率 δ_5 (%)	冷弯	
						(N/mm^2)	(N/mm^2)		不 低 于	
									弯曲角度	弯心直径
1	I级	甲类3号钢	8~25 28~40	光圆	ϕ	235	370	25	180°	d $2d$
2	II级	20 锰 硅	8~25	人字纹 或月牙纹	\oplus	335	510	16	180°	3d
		20 锰 硅 半	28~40			315	490			4d
3	III级	25 锰 硅	10~40	人字纹 或月牙纹	\ominus	370	570	14	90°	3d
4	IV级	40硅2锰钒	10~25 28~32	螺旋纹	$\omin�$	540	835	10	90°	5d
		45硅2锰钒								45硅2锰钒

二、钢筋的冷拉和冷拔

所谓冷拉，就是预先将钢筋拉伸超过它的屈服强度，然后放松，于是在使用时，钢筋就会获得比原来屈服强度更高的新的屈服强度。如图1-6所示，钢筋原来的应力应变曲线为 $oAacd$ ，如果预先把钢筋拉到 a 点，超过原来的屈服强度，然后放松，那么钢筋获得残余变形 oo' 。如果立即重新加荷，应力应变曲线将沿 $o'acd$ 进行，屈服强度提高到 a 点，钢筋经冷拉后得到强化。如果冷拉到 a 点卸荷后，经过一段时间再施加拉力，则应力应变曲线将沿 $o'a'c'd'$ 进行，屈服强度提高到 a' 点，这种现象称为时效硬化。

钢筋冷拉后，屈服强度提高了，但伸长率有所降低。为了使钢筋经过冷拉不仅提高强度，并具有一定塑性，就要合理选择点 a 。该点的应力称为冷拉控制应力，与控制应力相应的应变称为冷拉率。

《混凝土工程施工及验收规范》规定的各级钢筋合适的冷拉控制应力值及最大冷拉率见表1-2。

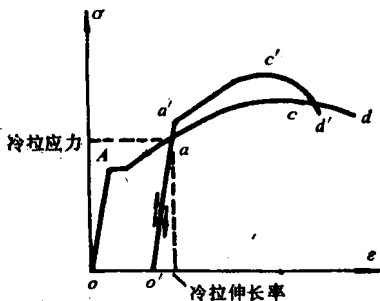


图 1-6 钢筋冷拉后的应力应变曲线

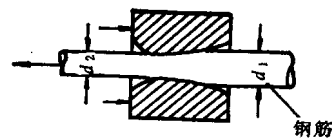


图 1-7 合金拔丝模

钢筋冷拉只能提高其抗拉强度，而不提高其抗压强度，所以冷拉钢筋不宜作为受压钢筋用。如用作受压，则其强度仍采用未经冷拉的抗压强度。对于直径大于 $\phi 12$ 的I级钢

冷拉控制应力及最大冷拉率

表 1-2

项 次	钢 筋 级 别	冷 拉 控 制 应 力 (N/mm^2)	最 大 冷 拉 率 (%)
1	I	280	≤ 10
2	II	450($\phi 28 \sim \phi 40$ 为430)	≤ 5.5
3	III	500	≤ 5
4	IV	700	≤ 4

筋，因为它与混凝土之间的粘结力小，也不考虑利用因冷拉所提高的强度。

冷拉钢筋的强度值见附录2-3。

冷拉 I 级钢筋常用作普通钢筋（非预应力钢筋），冷拉 II 级、III 级和 IV 级因其强度较高，主要用作预应力钢筋。

冷拔是将钢筋用强力拔过比其直径还小的硬质合金拔丝模（图1-7），使它产生塑性变形，拔成较细的钢丝。经多次冷拔后钢丝的强度比原来提高很多，但塑性降低。例如一根 $\phi 6$ 的 I 级钢筋，经三次冷拔到 $\phi 3$ 时，其强度由原来 $235N/mm^2$ 提高到 $750N/mm^2$ ，而伸长率却由原来的 21.9% 降低到只有 3.3%。

由低碳钢冷拔而成的钢丝叫做冷拔低碳钢丝，常用作预应力钢筋，也可用作非预应力钢筋。

1-2 混 凝 土

一、混凝土的强度

混凝土的强度与试件的形状、尺寸、材料配制、养护条件及受力情况等因素有关。由于生产过程和原材料组成的不稳定，即使是按同一配合比在同样条件下制作的混凝土，用同一方法到同一试验机上去试验，测得的立方体抗压强度不尽相同，因此要科学地描述强度需运用概率论和数理统计知识。

1. 概率定义及正态分布的特性

(1) 随机变量

对于具有多种可能发生的结果，而事先不能断言会出现哪种结果，这类现象称为随机现象。表示随机现象各种结果的变量，称为随机变量。

(2) 频数、频率和概率

在某一试验中（例如材料强度测定），某一结果（如某一范围的强度值，常称为事件）发生的次数为 k ， k 称为频数；频数与试验的总次数 n 的比值，称为某事件发生的频率。

在大量重复试验中，事件 A 的发生频率总是稳定在一个确定的常数附近，我们就用这个数来表示事件 A 发生的可能性大小，并称这个数为事件 A 的概率，记作 $P(A)$ 。

图1-8示某预制构件厂生产的同一强度等级的混凝土的实测立方体抗压强度分布图。其中横坐标为实测强度（随机变量），纵坐标为落在某一强度区段内的试块数（频数）。这个图形称为强度统计直方图。

从混凝土立方体抗压强度统计直方图可以看出，混凝土立方强度这个随机变量时大时小，但大多数强度值接近其平均值。在工程中有许多随机变量，同混凝土立方体抗压强度一样，具有两头小中间大的规律。为了进一步分析，常假定它们服从图1-9所示的正态分布。

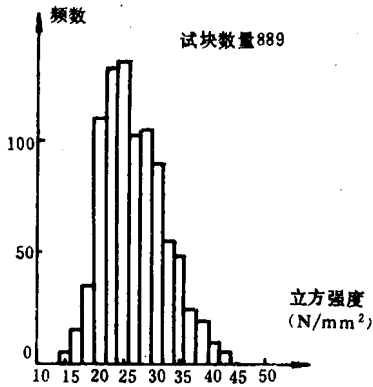


图 1-8 混凝土立方体抗压强度统计直方图

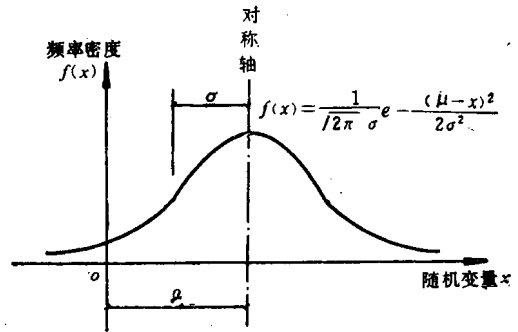


图 1-9 正态分布曲线

正态分布曲线呈钟形，横坐标表示随机变量 x ，纵坐标表示随机变量的频率密度 $f(x)$ ；即随机变量 x 在横坐标某一区段上出现的百分率（或称频率）与该区段长度的比值。

正态分布曲线有三个特征值：

(1) 平均值

平均值

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1-1)$$

式中 x_i ——第 i 个随机变量取值；

n ——随机变量的取值个数。

平均值 μ 越大，分布曲线峰点离开纵坐标的水平距离越远。

(2) 标准差

标准差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu - x_i)^2}{n - 1}} \quad (1-2)$$

标准差 σ 反映随机变量的分布情况，图1-10中给出了平均值相同而标准差不同的三条正态分布曲线。标准差小，随机变量离散程度小，曲线高耸；标准差大，随机变量离散程度大，曲线扁平。标准差 σ 在几何意义上表示分布曲线顶点到反弯点之间的水平距离。

(3) 变异系数

变异系数

$$\delta = \frac{\sigma}{\mu} \quad (1-3)$$

变异系数 δ 反映随机变量的相对离散程度， δ 大，随机变量离散程度大； δ 小，离散程度小。

由概率论可知，频率密度的积分称为概率，各频率之和等于1或 $f(x)$ 与横坐标所围的面积为1，即

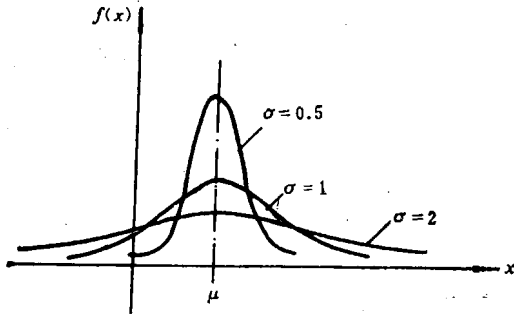


图 1-10 标准差不同的正态分布曲线

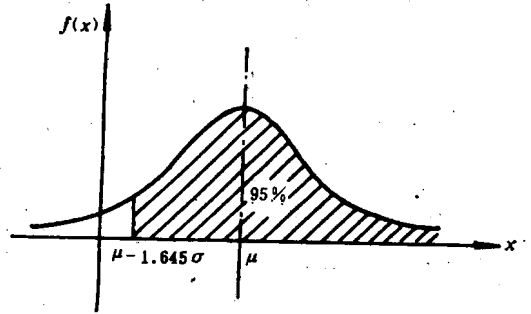


图 1-11 随机变量的概率

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$$

如图1-11所示, 随机变量大于和等于平均值 μ 的概率为50%, 随机变量大于 $\mu - 1.645\sigma$ 值的概率为95%, 即

$$P = \int_{\mu - 1.645\sigma}^{+\infty} f(x) dx = 0.95$$

如果随机变量代表材料的强度, 当强度取 $\mu - 1.645\sigma$ 时, 则实际强度高于该值的概率为95%, 也即所取强度值具有95%的保证率。

2. 混凝土立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 及混凝土强度等级

立方体抗压强度标准值是指按照标准方法制作养护的边长为150mm的立方体试块, 在28天龄期, 用标准试验方法测得的具有95%保证率的抗压强度。

如果认为混凝土立方强度这个随机变量服从正态分布, 设测得的混凝土立方体抗压强度平均值为 $\mu_{f_{cu}}$, 标准差为 σ , 变异系数 $\delta = \frac{\sigma}{\mu_{f_{cu}}}$, 则立方体抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ 为:

$$f_{cu,k} = \mu_{f_{cu}} - 1.645\sigma = \mu_{f_{cu}} - 1.645\delta \cdot \mu_{f_{cu}} = \mu_{f_{cu}} (1 - 1.645\delta) \quad (1-4)$$

各种强度等级的变异系数 δ 根据统计结果可按表1-3取用。

混凝土强度的变异系数 δ

表 1-3

混凝土强度等级	C7.5	C10	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
离散系数	—	0.24	0.21	0.18	0.16	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.10

立方体的受力情况并不代表混凝土在构件中的受力情况, 它只是一种衡量混凝土强度的基本指标, 混凝土强度等级就是按立方体抗压强度标准值确定。《混凝土结构设计规范》规定的混凝土强度等级有C7.5、C10、C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55和C60。C20就是表示立方体抗压强度标准值为20N/mm²的混凝土。在钢筋混凝土结构中一般采用C15~C30级, 当采用II、III级钢筋时, 混凝土强度等级不宜低于C20。

3. 混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck}

通常钢筋混凝土受压构件的高度比它的截面边长大很多, 因此棱柱体试件的受力状态

更接近于构件中混凝土的受力情况。混凝土轴心抗压强度标准值是利用高宽比 $h/b = 3 \sim 4$ 的试件进行试验得出的，并且具有95%保证率。根据试验并考虑过去的设计经验，规范取

$$f_{ck} = 0.67f_{cu,k} \quad (1-5)$$

由于强度等级高的混凝土在破坏时表现出明显的脆性性质，所以 C45、C50、C55 和 C60 混凝土由公式 (1-5) 算得的轴心抗压强度还应分别乘以 0.975、0.95、0.925 和 0.9 的折减系数。

4. 混凝土抗拉强度标准值 f_{tk}

混凝土抗拉强度是确定钢筋混凝土构件抗裂度的重要指标。混凝土抗拉强度远小于其抗压强度，一般约为 $1/8 \sim 1/17f_{cu,k}$ ，而且不与 $f_{cu,k}$ 成线性关系， $f_{cu,k}$ 越大，比值 $f_{tk}/f_{cu,k}$ 越小。根据试验及过去的设计经验，规范用

$$f_{tk} = 0.23f_{cu,k}^{2/3}(1 - 1.645\delta)^{1/3} \quad (1-6)$$

考虑强度等级高的混凝土在破坏时表现出明显的脆性性质，C45、C50、C55 和 C60 混凝土由公式 (1-6) 求出的轴心抗拉强度还应分别乘以 0.975、0.95、0.925 和 0.9 的折减系数。

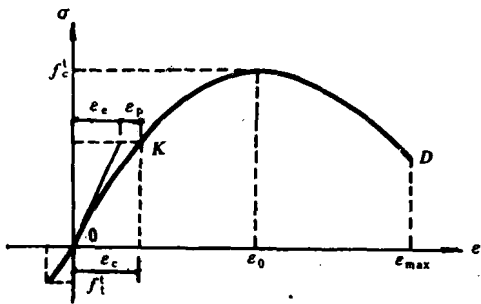


图 1-12 混凝土应力应变曲线

弹性阶段。随着应力的增大，应力应变曲线逐渐偏离直线而向下弯曲，即应变比应力增长快，混凝土出现明显的塑性性质。混凝土的应变包括弹性应变 ϵ_e 和塑性应变 ϵ_p 两部分。应力应变图中的最大应力值就是轴心抗压强度试验值 f_c^t ，相应的应变 ϵ_0 约等于 $1.5 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3}$ 。以后应力逐渐减小，应变不断增加，直到 D 点试件破坏，相应的极限压应变为 ϵ_{max} 。

实际结构所受的荷载是不能象试验机加载那样稳定地下降，因此对于截面上压应力均匀分布的素混凝土构件来说，是不存在下降段，它的极限压应变应为 ϵ_0 。但是对于截面上压应力分布不均匀的钢筋混凝土构件，例如受弯构件，当受压边缘达抗压强度时，并不会使构件立即破坏，这时还没有达到抗压强度的邻近纤维的应力将继续增加，从而使边缘纤维的应力经历下降段。构件破坏时，边缘纤维的混凝土应变可达 $\epsilon_{max} = 2 \times 10^{-3} \sim 6 \times 10^{-3}$ 。

混凝土受拉应力应变曲线相似于受压的应力应变曲线，但拉伸极限应变很小，一般只有 $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.15 \times 10^{-3}$ 。

2. 混凝土的弹性模量和变形模量

软钢在屈服前（严格地说是比例极限前）的应力与应变成正比，我们把 σ/ϵ 定义为弹

性模量 E_s ，它表示材料抵抗变形的能力。只要应力小于屈服强度，同一种钢材， E_s 是一个常量。

对于混凝土来说，当应力较小时，应力与应变才成正比，同钢材一样，也可把 $\sigma_c/\epsilon_0 = \text{tg}\alpha_0$ ，即把应力应变曲线原点切线的斜率定义为混凝土的弹性模量 E_c 。（图1-13），即

$$E_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_0} = \text{tg}\alpha_0 \quad (1-7)$$

当应力稍大时，混凝土处于弹塑性阶段（图1-13），为了反映这一阶段的变形性能，比照弹性模量的定义，对于某点 K ，把割线 OK 的斜率定义为混凝土的变形模量 E'_c 。（或称弹塑性模量），即

$$E'_c = \text{tg}\alpha = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_c}{\epsilon_0 + \epsilon_p} \quad (1-8)$$

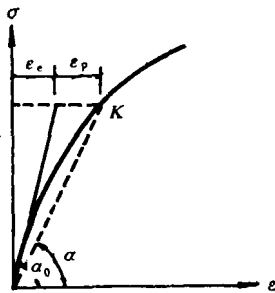


图 1-13 混凝土的弹性模量和变形模量

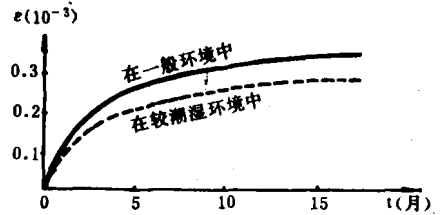


图 1-14 混凝土的收缩

显然，变形模量 E'_c 不是常量，不同点（即不同应力）有不同的值， σ_c 越大， E'_c 越小。

由公式（1-7）和（1-8）知：

$$E'_c = \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_c} \frac{\sigma_c}{\epsilon_0} = \nu E_c \quad (1-9)$$

式中 $\nu = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_c}$ ，称为混凝土的弹性特征系数。显然， ν 值不是常量，它随应力的增大而减小，也即变形模量随应力增大而减小。通常 $\nu = 0.4 \sim 1.0$ 。

通过大量试验，混凝土弹性模量取下式计算：

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{f_{cu,k}}} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1-10)$$

其值见附录2-2。

混凝土受拉时的弹性模量 E_{ct} 基本上与受压时弹性模量 E_c 相等，受拉时变形模量 E'_{ct} 也可表示为：

$$E'_{ct} = \nu_t E_{ct} = \nu_t E_c \quad (1-11)$$

式中 ν_t 为受拉时的弹性特征系数。混凝土临近拉裂时， $\nu_t = 0.5$ 。

3. 混凝土的收缩

混凝土在空气中结硬时，体积会收缩；在水中结硬时，体积会膨胀。收缩值比膨胀值大得多。收缩包括水泥结硬时产生的凝缩和干燥环境中产生的干缩。混凝土收缩规律如图 1-14 所示，混凝土从开始凝结起就产生收缩，初期收缩较快，两周内可完成全部收缩量的 25%，一般两年后趋于稳定，最终收缩量约 $2 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-4}$ 。

混凝土收缩是不受力情况下的自发变形，当受到外部或内部约束时，将在混凝土中产生拉应力，从而导致混凝土开裂。

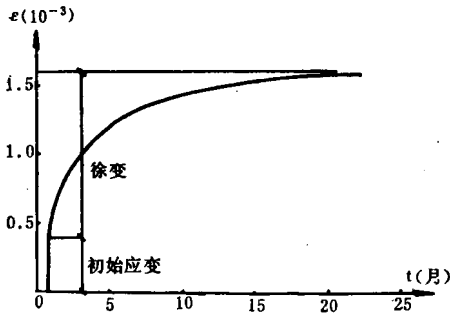


图 1-15 混凝土的徐变

1-15 所示，加荷初期，徐变增长较快，以后逐渐变慢，约两年左右基本稳定。徐变应变值一般约为加荷初期初始应变值的 2~4 倍。

试验证明，影响混凝土徐变的因素主要是持续应力的大小。持续作用的应力越大，则徐变越大。当应力较小 ($\sigma < 0.5f_c^t$, f_c^t 为轴心抗压强度试验值) 时，徐变与应力成线性关系；当应力较大 ($\sigma > 0.5f_c^t$) 时，徐变急剧增加，并会导致混凝土的破坏。所以，如果构件的混凝土在使用期间经常处于不变或少变的高压应力状态是很不安全的。

试验还表明，加荷时混凝土的龄期越短，徐变越大；水泥用量越多，徐变越大；水灰比越大，徐变也越大。

混凝土的徐变会使钢筋混凝土构件变形增加，也会导致预应力混凝土的预应力损失。但混凝土徐变也会带来一些有利的影响，例如减少应力集中现象和降低温度应力等。

试验指出，水泥用量越多、水灰比越大、骨料级配越差，养护条件不好，收缩越大。因此，加强养护、减小水灰比、减少水泥用量、加强振捣以及初凝时用铁板在构件表面上压光等都是减小收缩的有效措施。

4. 混凝土的徐变

在持续荷载作用下，混凝土的变形会随着持续时间而不断增长，这种随时间而增长的变形称为徐变。徐变发展规律如图

1-3 钢筋与混凝土之间的粘结力

钢筋与混凝土这两种材料所以能够形成整体，共同承担作用，是因为它们之间具有足够的粘结强度，承受了由于阻止相对滑动，在沿钢筋和混凝土接触面上产生的剪应力，通常把这种剪应力称为粘结应力。

图 1-16a 示钢筋表面有塑料套管的梁，钢筋与混凝土之间不存在阻止相对滑动的相互作用力，因此梁受力后，钢筋不伸长，不参加受力，构件实际上是一有孔的素混凝土梁。图 1-16b 示钢筋与混凝土之间具有充分粘结强度的梁，梁受力后，钢筋与混凝土接触面上产生粘结应力，并通过它将部分拉力传给钢筋，使钢筋受拉，从而使混凝土和钢筋共同承担作用。显然，钢筋中的拉力大小，取决于钢筋与混凝土之间的粘结作用。

钢筋与混凝土之间的粘结力由三部分组成：