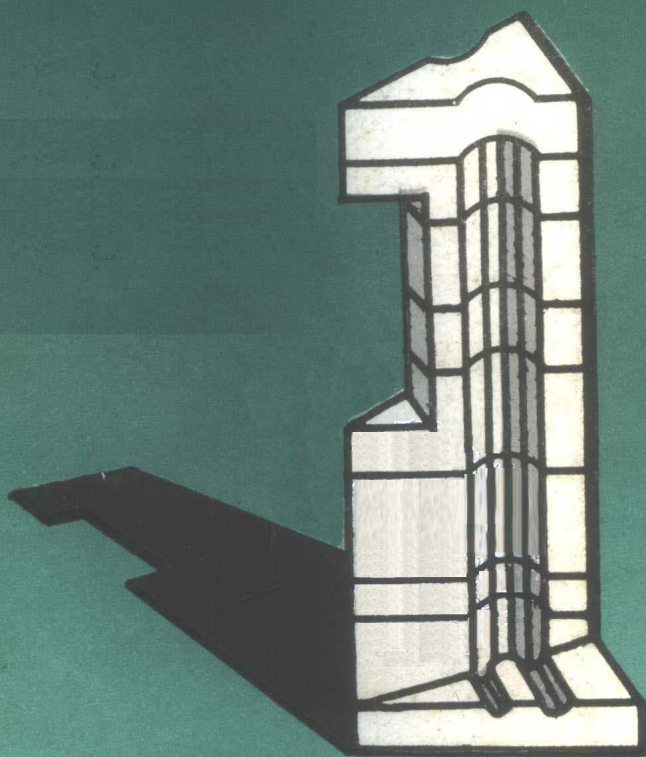


现代钢筋混凝土基本理论

周 氏 康清梁 童保全 编



上海交通大学出版社

现代钢筋混凝土基本理论

周 氏

康清梁 编
童保全

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书对钢筋混凝土近代发展的基本理论作了简明扼要的介绍。全书共分七章，内容包括：工程结构的可靠度近似概率理论，混凝土的本构关系和应力-应变理论，钢筋混凝土正截面和斜截面的强度计算原则，钢筋混凝土的延性、钢筋混凝土结构的裂缝和耐久性理论以及钢筋混凝土有限元分析方法等。

本书可作为结构工程专业的研究生教材，也可以作为已掌握一般钢筋混凝土结构理论的本科生的参考书或选修课教材，还可供土木水利工程技术人员进一步了解钢筋混凝土学科近期发展的参考。

现代钢筋混凝土基本理论

上海交通大学出版社出版

(淮海中路1984弄19号)

新华书店上海发行所发行

上海交通大学印刷厂印装

开本 850 × 1168 毫米 1/32 印张 11.625 字数 300000

1989年2月第1版 1989年3月第1次印刷

印数： 1—3800

ISBN7-313-00373-0/TV·1 科技书目：187-308

定价：2.65 元

前 言

钢筋混凝土学科各个方面,包括可靠度理论、混凝土的本构关系及强度理论、钢筋混凝土的延性、钢筋混凝土结构的非线性有限元分析、裂缝理论和钢筋锈蚀理论等等,近年来都有较大的发展。

本书简明扼要地介绍了近代钢筋混凝土发展的有关基本理论,故可作为结构工程专业的研究生教材,也可作为已掌握一般钢筋混凝土结构理论的大专院校本科生的参考书或选修课教材。对于土木水利工程技术人员,本书也可作为进一步了解钢筋混凝土学科近期发展的参考用书。

全书共分七章,内容包括新编混凝土结构设计规范采用的可靠度近似概率理论、混凝土的本构关系和强度理论、钢筋混凝土正截面和斜截面强度计算原则、钢筋混凝土的延性、钢筋混凝土结构的裂缝和耐久性理论以及钢筋混凝土有限元分析等。

限于篇幅,本书着重于讲清基本概念和基本理论,尽可能避免过多的数学推导和试验资料的堆砌。

本书是在为研究生所编的讲义基础上补充修改而成的。第1、2、3、4、6章为周氏执笔,第5章为童保全执笔,第7章为康清梁执笔,全书由周氏定稿。在编写过程中,参考了有关专著和科研成果。但限于水平,必然还有不少缺点和错误,敬请读者提出宝贵的批评和指正。

编者

1988年3月于河海大学

目 录

第一章 钢筋混凝土结构的设计原则和可靠度理论.....	1
§ 1-1 钢筋混凝土结构设计理论的发展	1
§ 1-2 钢筋混凝土可靠度理论的研究	7
§ 1-3 近似概率设计法的原理	14
§ 1-4 荷载与抗力的统计分析	30
§ 1-5 我国《建筑结构设计统一标准》的实用表达式	40
第二章 混凝土的力学本构关系和破坏准则.....	48
§ 2-1 混凝土内部微裂缝和破坏机理	48
§ 2-2 混凝土单轴短期单调加载时的强度	56
§ 2-3 混凝土单轴短期单调加载时的应力-应变关系	64
§ 2-4 混凝土单轴受压应力-应变曲线的数学表达式	72
§ 2-5 复杂应力状态下的混凝土性能	80
§ 2-6 混凝土的强度破坏准则	104
第三章 钢筋混凝土构件的正截面强度	119
§ 3-1 引言	119
§ 3-2 容许应力法	121
§ 3-3 极限强度理论的基本原则和假定	126
§ 3-4 正截面的极限强度计算	132
§ 3-5 长柱的分析	153
第四章 钢筋混凝土构件的抗剪计算	166
§ 4-1 抗剪强度计算的发展	166
§ 4-2 斜裂缝的形成及剪力传递的模式	171
§ 4-3 斜截面破坏形态及其影响因素	179

§ 4-4	剪切强度控制区与抗剪力学模型	193
§ 4-5	几个主要的抗剪强度计算公式	197
第五章 钢筋混凝土构件的裂缝与耐久性		214
§ 5-1	概述	214
§ 5-2	抗裂度验算	218
§ 5-3	裂缝宽度计算	223
§ 5-4	横向裂缝与钢筋锈蚀的关系	240
§ 5-5	钢筋混凝土的耐久性	247
第六章 钢筋混凝土结构的延性		255
§ 6-1	概述	255
§ 6-2	构件的曲率延性	258
§ 6-3	影响构件延性的因素	266
§ 6-4	构件的转角延性及位移延性	272
§ 6-5	构件在低周循环荷载作用下的变形性能	275
§ 6-6	延性和抗震计算的关系	288
第七章 钢筋混凝土结构有限元分析		297
§ 7-1	概述	297
§ 7-2	有限元分析基础	298
§ 7-3	钢筋混凝土结构的有限元模型	308
§ 7-4	混凝土非线性材料模式	335
§ 7-5	混凝土裂缝	345
§ 7-6	钢筋和混凝土之间的粘结和滑移	351
参考文献		357

第一章 钢筋混凝土结构的设计

原则和可靠度理论

§ 1-1 钢筋混凝土结构设计理论的发展

在钢筋混凝土应用的初期，人们主要着眼于整个构件的实际承载能力，而未能建立起材料的精确的应力应变关系和截面强度等系统概念。主要依靠对一些构件进行承载试验，提出有关构件强度的一些见解。从原则上讲，这些见解是基于极限强度理论的。例如 Kolmen(1886)首次发表了极限荷载理论，Thullie(1897)发表了弯曲理论，Ritter(1899)指出混凝土的受压应力图形为抛物线等等。但这些研究并未建筑在材料的精确的力学特性关系之上，因此具体应用时就形成较大困难。

1900年，已形成完整的钢筋混凝土的弹性理论(Coignet, Tedesco等)系统，并为大家所接受。极限强度理论的研究由此反而几乎停顿。现在我们都非常清楚，混凝土不是线弹性材料。但在当时，线弹性理论已在其他结构(钢、木、砌体等)中通用，加上以弹性理论为依据的容许应力设计方法对设计来说也是比较方便的。只要容许应力值取得合适，也可设计出既安全又经济的结构。因此，线弹性理论几乎使用了半不多世纪。

到了40年代，人们对线弹性理论所固有的缺点日益认识，随之又重新转向极限强度理论的探索，并取得了突破性的进展。目前，世界各国几乎都已摒弃了经典的容许应力法，而是依据极限强度理论制定了实用的设计规范。历史似乎绕了一圈，但现今的极限强度理论有了很大改进，已完全不同于早期的理论了。

回顾钢筋混凝土设计理论发展过程中的各个阶段，仍然是有

必要的。

一、容许应力理论

容许应力法的表达式为

$$\sigma \leq [\sigma], \quad (1-1)$$

式中的 σ 为构件在使用阶段（使用荷载作用下），截面上的最大应力； $[\sigma]$ 为材料的容许应力。

用于钢筋混凝土，则要分别验算混凝土应力 σ_c 及钢筋应力 σ_s ，要求 $\sigma_c \leq [\sigma_c]$ ； $\sigma_s \leq [\sigma_s]$ 。

计算截面最大应力时，依据的是线弹性理论，即假定钢筋和混凝土均为弹性材料，完全服从胡克定律，即 $\sigma_s = E_s \varepsilon_s$ ， $\sigma_c = E_c \varepsilon_c$ ，弹性模量 E_s 及 E_c 为常值；截面变形后假定仍为平面（图 1-1）。由于钢筋的应变 ε_s 与同位置的混凝土纤维应变 ε_c 相等，即 $\varepsilon_s = \varepsilon_c$ ，所以钢筋应力为

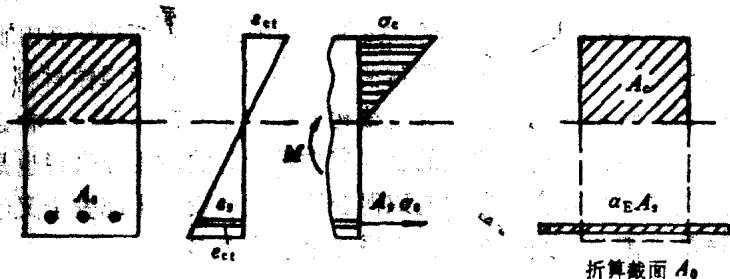


图 1-1

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s = E_s \varepsilon_c = E_s \cdot \sigma_c / E_c = \alpha_E \sigma_c. \quad (1-2)$$

即钢筋应力为同位置的混凝土应力的 α_E 倍（ $\alpha_E = E_s / E_c$ ，称为弹模比或折算比），也就是单位钢筋面积的作用相当于 α_E 倍单位混凝土面积。所以钢筋面积 A_s 可折算为 $\alpha_E A_s$ 的同位置混凝土

面积。由此，截面的折算面积 $A_0 = A_c + \alpha_E A_s$ ，在强度计算时。假定受拉区混凝土已开裂不起作用，所以 A_c 仅指受压区的混凝土面积。

把钢筋折算为混凝土后，就可用单一材料的弹性体公式计算截面应力，对于受弯构件，有

$$\sigma = M/W_0 = M y / I_0. \quad (1-3)$$

折算截面的重心轴位置可由静力平衡条件及平截面假定求出。具体的计算公式及步骤可参阅文献 [12]、[13]。

事实上，混凝土并不是弹性的，其变形模量要比弹性模量 E_c 低得多，因此折算比 α_E 取为 E_s/E_c ，就把钢筋的作用估低了。在历次规范的修订中，曾人为地提高 α_E 值。以考虑混凝土塑性应变的影响。

容许应力理论除了不考虑材料塑性性质这一根本缺陷外，在结构的可靠度原则方面也存在许多问题：①没有对使用阶段给出明确的定义，也就是使用期间荷载的取值原则规定得不明确。实际上，使用荷载是由传统经验或个人判断确定的，缺乏科学根据；②把影响结构可靠的种种因素（荷载的变异、施工的缺陷、计算公式的误差等）统统归结在反映材料性质的容许应力 $[\sigma]$ 上，显然不够合理；③ $[\sigma]$ 的取值也无科学根据，纯属经验的，历史上曾多次提高过材料的容许应力值；④按容许应力法设计的构件是否安全可靠，无法用实验来验证；⑤对于钢筋混凝土，要同时满足 $\sigma_s \leq [\sigma_s]$ ， $\sigma_c \leq [\sigma_c]$ ，无法得出构件实际可靠程度的总的概念。

二、破损阶段理论

容许应力理论存在的重大缺陷，使不少研究者转向极限强度理论的探索。苏联 А. Ф. Лолейт, А. А. Гвоздев, П. А. Пастернак 等人对此作出了很大贡献，奠定了按构件破坏时的截面应力状态进行设计的极限强度理论基础。在苏联，这一新

的理论曾称之为破损阶段理论。并制订了第一本以此理论为据依的钢筋混凝土设计规范 OCT 90003-38。

破损阶段理论不研究构件在使用时的状况而直接研究构件最终破坏时的承载能力 (M_u 、 N_u 或 V_u)。例如对于一矩形单筋梁, 由试验得出在最终破坏时的截面应力图形, 从而求得截面极限弯矩 M_u 。按破损阶段理论设计时, 要求作用在截面上的弯矩 (由荷载引起的) 不大于极限弯矩除于某一安全系数。其表达式即为

$$M \leq M_u / K. \quad (1-4)$$

安全系数 K 是用来考虑影响结构安全的所有因素的。

破损阶段理论的优点是: ①它可以反映出材料的塑性性质, 结束了长期以来假定混凝土为弹性体的局面; ②采用一个安全系数, 使构件有了总的安全度的概念; ③它以承载能力值 (如 M_u) 为依据, 其计算值是否正确可由实验检验。所以, 可以说破损阶段法开创了一个新局面。

苏联曾把该理论用下式来表达:

$$KM (\sum q_i) \leq M_u (\mu_{fs}, \mu_{fc}, a \dots), \quad (1-5)$$

式中的 M 为正常使用时, 由各使用荷载 q_i 所产生的截面内力; a 为反映截面尺寸、钢筋面积及位置等的尺寸函数; μ_{fs} 、 μ_{fc} 为材料强度的平均值或标定值。对于钢筋, 以若干试件所得的平均强度取值; 对于混凝土, 一般就采用相应于标号的强度。

用上式表示的破损阶段理论仍存在一些重大缺点: ①按破损阶段计算, 构件的强度是得以保证了, 但却无法了解构件在正常使用时能否满足正常使用要求; ②安全系数 K 的取值仍然须经验确定, 并无严格的科学依据; ③采用笼统的单一安全系数, 无法就不同荷载、不同材料对构件安全的影响加以区别对待, 不能正确地度量结构的安全度; ④荷载 q_i 的取值也仍然是经验的; ⑤表达式中采用的材料强度是平均值 (或标定值), 它不能正确反映材料强度的变异程度, 显然也是不够合理的。

三、极限状态理论

由于破损阶段理论还有诸多缺点，进一步发展的极限状态理论应运而生。极限状态的主要概念是明确结构或构件进入某种状态后就丧失其原有功能，这种状态就称为极限状态。这一理论也是苏联（Н.С.Стрелечкий等）首先采用的。当时曾提出了三种极限状态：①承载能力极限状态，②挠度极限状态，③裂缝开展宽度极限状态。其表达式分别为：

$$\left. \begin{aligned} M &\leq M_u \\ f &\leq [f] \\ w_{cr} &\leq [w_{cr}] \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

这样，它就克服了破损阶段理论的第①个也是主要的缺陷，考虑问题更为全面了。苏联在1955年提出了第一部按极限状态设计的规范（ННТ-123-55）。对承载能力极限状态，它采用了如下的表达式：

$$M(\sum n_i q_i^k \dots) \leq M(m, f_s, f_c, a \dots) \quad (1-7)$$

式中的 n_i 为超载系数（或荷载系数），对不同的荷载采用不同的数值， n_i 大体在1.1~1.4之间； q_i^k 为荷载的标准值，由长期观察统计确定； m 为工作条件系数，以反映施工质量及使用环境等对安全度的影响， m 大体在0.8~1.25之间，同时还考虑钢筋在混凝土中的钢筋工作条件系数 m_s ； f_s 、 f_c 材料的计算强度， $f_s = k_s f_s^k$ ； $f_c = k_c f_c^k$ ，其中 k_s 、 k_c 称为匀质系数， f_s^k 、 f_c^k 为材料的标准强度。

在这里，为了克服破损阶段理论的第②、③缺点，表达式（1-7）不再采用单一的安全系数，而引入超载系数 n 、工作条件系数 m 及材料匀质系数 k_s 和 k_c 来反映不同荷载、不同材料及不同条件下的结构安全度的要求。为了克服第④、⑤缺点，对荷载及材料强度的计算值采用了数理统计方法，以考虑这些随机变

量的离散性。

例如对于钢筋强度，根据大量试件实测，可得出某一型号钢筋的屈服强度的概率分布曲线（图 1-2），并求得强度的平均

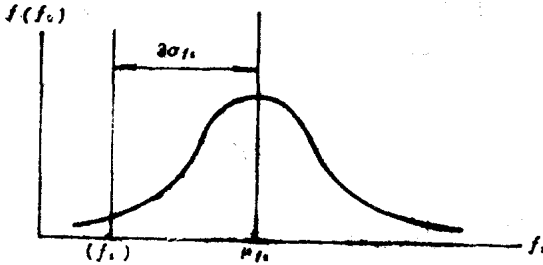


图 1-2

值 μ_{f_s} 及标准差 σ_{f_s} 。苏联 ННТу-123-55 规范规定钢筋的计算强度 f_s 取为

$$f_s = \mu_{f_s} - 3 \sigma_{f_s} \quad (1-8)$$

式中系数 3 称为保证率系数，当取为 3 时，材料实际强度大于计算强度 f_s 的概率为 99.87%。对混凝土强度也作类似的处理。这样，材料计算强度中包含了平均值及标准差两个统计参数，就能比较完整地反映材料强度的变异（匀质）程度，显然比式 (1-5) 中所用的平均强度合理得多。

对于荷载标准值 q_k^* 及计算值 $n_k q_k^*$ ，理论上也可作同样的数理统计。对不同变异性质的荷载取用不同的计算值（不同的超载系数）也显然比用同一个 K 合理得多。

由于极限状态理论具有明显的优点，因此我国在 60 年代初就加以引用。1966 年制定了我国第一部按极限状态理论的设计规范 BJG21-66。世界大多数国家也先后在 70 年代过渡到采用极限状态理论。

苏联早期规范及我国BJG21-66规范中,材料计算强度是由式(1-8)确定的,其保证率达到99.87%。这一数值的确定具有较大的主观性,因为实际上还没有统计到材料实际强度会有 $(\mu_f - 3\sigma_f)$ 那么低的数值。造成这一问题的原因是式(1-7)中把影响安全的其他一些因素全都归在材料计算强度中来反映了,这是一个缺点。因此,我国1974年修订的钢筋混凝土结构设计规范TJ10-74就在此基础上把材料计算强度加以适当提高,改为 $f = \mu_f - 2\sigma_f$ 。即把式(1-8)中的保证率系数由3减为2,保证率减至97.73%。同时为了考虑其他因素对结构安全的影响,在设计表达式中增加一个构件强度系数 K_2 , K_2 暂由经验确定,例如对于受弯构件,取 $K_2 = 1.26$ 。同时TJ10-74为了简化,对所有荷载的超载系数一律取为常值 $K_1 = 1.2$,并把工作条件系数改为 $1/K_3$ (K_3 称为附加安全系数,一般情况 $K_3 = 1$),独立于承载能力函数之外。这样,设计表达式就由式(1-7)改为

$$K_1 \Sigma M(q_i) \leq \frac{1}{K_2 K_3} M(f, f_c, a \dots) \quad (1-9)$$

将 $K_2 K_3$ 移至式左,并将 $K_1 K_2$ 合并为单一的安全系数 K ,即成为用单一系数表达的极限状态设计法。

由上可知,传统的工程结构设计法,从可靠度来说,是属于经验系数法的,它把影响结构可靠性的各类参数均视作为定值,并由经验的系数来保证其安全,故也称为“定值设计法”或“经验设计法”。早期的极限状态理论虽对部分参数应用概率统计的办法加以分析,但总体上还没有脱出经验设计法的框子。目前,工程结构设计正从经验设计法向以可靠度理论为基础的“概率设计法”转变,这将引起工程结构设计发生巨大的变革。

§ 1-2 钢筋混凝土可靠度理论的研究

一、概况

近20多年来,结构可靠度理论的研究受到普遍重视,已有

了迅速的发展。其特点是概率论和数理统计等可靠度数学方法已广泛地应用于工程设计中。一些主要国家都非常重视将结构工程的可靠度(安全度)理论引入设计规范,建立了各种专门机构来从事这方面的工作。值得注意的是,这些标准规范的研究编制已超出国家的界限而向国际性发展。1971年由欧洲混凝土委员会(CEB)、国际预应力混凝土协会(FIP)、国际房屋建筑协会(CIB)、欧洲钢结构协会(CECM)、国际桥梁与结构工程协会(IABSE)、国际材料与结构研究所联合会(RILEM)等6个国际组织联合成立了“结构安全度联合委员会(JCSS)”,专门从事安全度的研究,编制了《结构统一标准规范的国际体系》。

《国际体系》把概率论和可靠度理论系统地应用到工程结构设计中来,对定值设计法转变为概率设计法起了很大的作用。

国际上把处理可靠度的水平分为三个水准:

水准 I——采用半概率方法(见 §1-2 之三);

水准 II——采用近似概率法(见 §1-3);

水准 III——采用全概率法,全概率法是完全基于概率论的结构整体优化设计法,迄今还只是一设想。

目前,大多数国家的钢筋混凝土设计规范(包括我国的 TJ10-74、SDJ20-78 等规范)仍处于水准 I 的水平。我国 1984 年公布的《建筑结构设计统一标准 GBJ68-84》以及据此编制的《混凝土结构设计规范》则已以近似概率法为基础了,从而在工程结构设计方法上跨出了重大一步。

二、极限状态的定义

国际标准化组织(ISO)对工程结构的极限状态作了如下定义:所谓极限状态是指结构或结构的一部分濒于失效的一种状态,亦即在这种状态下,结构恰好达到设计所要求的某种功能的极限。

ISO 把极限状态分成两种：

(1) 承载能力极限状态——相当于结构达到最大承载能力的极限状态；

(2) 正常使用极限状态——取决于控制结构正常使用或耐久性的标准。

具体来说，承载能力极限状态指的是：①作为刚体的结构，部分或整体地失去平衡；②关键截面的破坏；③结构变成机动体系；④由于变形产生的失稳；⑤由于疲劳作用引起的破坏；⑥由于变形过大引起过大的几何变形，致使必须更换结构或构件。承载能力极限状态或可更确切地称为“最终极限状态”，因为它除了最大承载能力的概念以外，还包括了在维持承载能力条件下出现过残余变形使结构完全不能使用的情况在内。

正常使用极限状态指的是：①正常使用中产生过大的变形；②裂缝出现过早及过宽；③未失去平衡的过大位移；④过大的振动；⑤不宜有的损害（腐蚀）。

极限状态的概念还在进一步深化。近年来有些高层建筑由于某一些部件的破坏而发生逐渐连续倒塌的事故，因此引出了一个新的“破坏-安全极限状态”的概念。即要求结构在偶然荷载（如地震、爆炸、车辆撞击等）作用下发生局部破坏时，能控制结构的其余部分不致由此发生连锁反应式的连续倒塌。其设计概念为，任一单独构件破坏后，结构仍能保持为稳定体系。

三、半概率设计法

目前，大多数国家的设计规范都采用以半概率设计法为基础的多系数表达的极限状态理论。在可靠度的处理方面主要有两点：①材料强度及荷载的标准值（特征值）必须用概率统计的方法处理；②另设一些分项系数 γ 以考虑其他影响可靠度的因素， γ 值则由经验规定。由于只有部分参数用概率处理，故称为半概率设计法。

材料强度的特征值 f_k 按下列公式计算 (图 1-3(a)):

$$f_k = \mu_f - k_f \sigma_f = \mu_f (1 - k_f \delta_f), \quad (1-10)$$

式中的 k_f 为保证率系数, 国际上一般采用 $k_f = 1.645$, 即相应的保证率为 95%; δ_f 为材料强度的变异系数, 为材料强度的标准差与平均值之比, 即 $\delta_f = \sigma_f / \mu_f$ 。

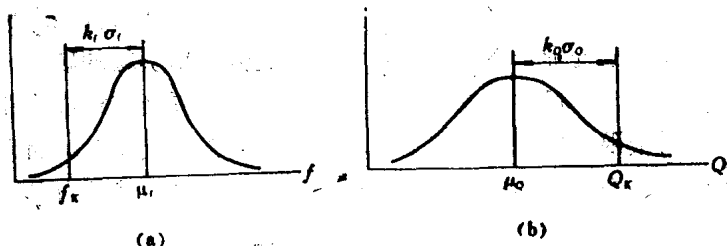


图 1-3

材料特征值 f_k 求得后, 进一步求出材料的设计强度 f_d 为

$$f_d = f_k / \gamma_f, \quad (1-11)$$

式中的 γ_f 为材料强度的分项系数。它用来考虑①结构构件中的材料强度与标准试件的强度之间的差异; ②材料与结构在施工过程中的局部缺陷; ③施工中的尺寸偏差; ④计算构件承载能力的公式的正确性。目前上述因素尚无法一一统计, 故 γ_f 只能由经验加以确定。

同理, 可按下式求得荷载的特征值 Q_k (图 1-3(b)) 为

$$Q_k = \mu_Q + k_Q \sigma_Q = \mu_Q (1 + k_Q \delta_Q). \quad (1-12)$$

荷载的保证率也取 95%, 即 $k_Q = 1.645$ 。

同样可求得设计荷载 Q_d 。

$$Q_d = \gamma_Q Q_k, \quad (1-13)$$

式中的 γ_Q 为荷载的分项系数。它由三部分组成, $\gamma_Q = \gamma_{Q1} \gamma_{Q2} \gamma_{Q3}$, 其中 γ_{Q1} 考虑荷载异常地超过特征值的可能性, 即为超载系数; γ_{Q2} 考虑各个荷载均以其特征值 (已有 95% 的保证率) 同时出

现的概率的减少，即为荷载组合系数，有时也用 ψ_0 表示； γ_{QS} 考虑计算结构荷载效应时可能发生的误差（如计算简图与实际受力之间的差异，发生未预见到的应力重分布，没有计及的温度湿度效应等）。

设计强度与设计荷载得出后，再进一步转化为截面的抗力 R 及结构的荷载效应 S 。

$$\left. \begin{aligned} R &= R(f_d) = R(f_k/\gamma_f) \\ S &= S(Q_d) = S(\gamma_Q Q_k) \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

设计时，应满足极限状态条件 $S \leq R$ ，设计表达式可写为：

$$\gamma_{QS} S(\gamma_{Q1}, \psi_0, Q_k) \leq R(f_k/\gamma_f, a \dots) \quad (1-15)$$

目前，国际上不少主要设计规范均采用式(1-15)所示的半概率极限状态设计模式。它们的保证率系数及分项系数分别取为

1. 英国规范《CP110》

(1) 保证率系数取为 $k_f = k_Q = 1.645$ ，即特征值取 95% 保证率。

(2) 材料强度分项系数 γ_f 取如表 1-1。

表 1-1 《CP110》的材料强度分项系数

极限状态		承载能力	正常使用	
			验算裂缝	验算挠度
钢 筋		1.15	1.0	1.0
混凝土	预制	1.4	1.3	1.0
	现浇	1.5	1.3	1.0

(3) 荷载分项系数

荷载分为永久荷载 G 、可变荷载 Q 及风载 W ，当其组合时，荷载分项系数按表 1-2 取用。