

绪 论

0.1 概述

钢筋混凝土是我国目前最大量、最常见的建筑结构形式。本课程的任务是研究钢筋混凝土构件的受力变形特点、破坏机理、设计原理、计算方法和构造要求,以及由这种构件组成的结构的计算方法和构造要求。

1. 本课程的性质及在土木工程中的地位

基本构件设计属于专业基础课,结构与施工属于专业课。本课程是土木工程专业的主干课,也是考研究生的必考课程,也就是说,它是搞土木工程的看家本领。学好本课程,可以为以后自学相应课程打下基础。

2. 本课程所需的基础

- (1) 高等数学;
- (2) 材料力学;
- (3) 结构力学;
- (4) 土力学与地基基础;
- (5) 建筑材料;
- (6) 建筑制图。

3. 本课程的特点

1) 材料复杂性

钢筋混凝土是由两种以上不同性质的材料组成的工程材料。与材料力学中所研究的单一、匀质、连续、弹性材料完全不同,它是非单一、非匀质、非弹性的材料。钢筋混凝土基本构件设计原理就是研究这种复杂材料的拉、压、弯、扭的受力变形问题。也就是说它们是研究钢筋混凝土材料的力学,外加一些构造要求。

2) 材料性质和应用的实践性

由于材料复杂,许多受力变形特点要靠科学试验和生产实践来探索。还有许多问题没搞清楚,至今还在研究之中。我国和国际上的相关专业杂志不下数百种,不断有文章报道研究结果,而且还要继续研究下去。

3) 材料的离散性

即使同一天搅拌的混凝土,其强度等级也有差异;即使同一窑砖,由于砖在窑中烧制时处于不同的部位,导致强度也不相同。所以强度指标都是由统计规律得到的。国家规定强度可靠度指标保证率要达到95%以上。

4) 计算方法的局限性

由于以上特性,计算方法只能采用半理论、半经验公式,而且限制条件多而复杂。

4. 如何学好本课程

因为材料复杂、离散性大、计算方法的局限性,因而规定多、头绪多。要学好本课程应注意以下几点:

(1) 要有好的基础,特别是材料力学、结构力学。因为钢筋混凝土的计算(包括带裂缝工作时的计算),通过特殊简化(如引进一些参数、采用一些假定等),都可转化为使用材料力学的相应公式。而各种结构的受力变形都按结构力学计算。

(2) 要理解与熟悉各种材料的物理力学性质,如钢筋和混凝土在受拉、受压时的应力应变关系,应力应变图上各控制点的物理意义,在各种构件中的作用和受力变形特点,各种构件的破坏机理、过程和外观表征等。

(3) 对于半理论、半经验公式,要理解这些公式的本质和应用条件,正确使用。

(4) 许多构件设计不是唯一的,没有正确与否,只有合理与否。设计的原则是适用、经济、安全、美观。

(5) 学规范,用规范。专业课与基础课的主要区别在于基础课揭示的是一般规律,而专业课揭示的是本专业的特殊规律,其中很多是通过科学试验和大量社会实践得来的。从专业课开始,就要建立规范的概念。规范是已经成熟的、经过科学试验和长期生产实践证明了的客观规律的总结,再经过国家专门部门批准的正式文件;是从事专业技术工作的法律。相关规范有:

① 《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)(本书以下简称《规范》);

② 《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068—2002);

③ 《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012);

④ 《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)(本书以下简称《震规》)。

(6) 要认真完成作业,加强基本功训练。

(7) 要重视实践环节,如参观、实习、课程实训等。

0.2 混凝土结构

1. 混凝土结构的特点

两种不同的材料有各自的优缺点：混凝土抗压强度高，耐火性好，但抗拉强度低（只有抗压强度的 $1/18 \sim 1/8$ ）；钢筋抗拉强度和抗压强度都很高，但耐火性差，容易锈蚀。

把钢筋配在混凝土梁的受拉一边，混凝土开裂以后可以代替混凝土受拉；把钢筋配在混凝土梁的受压一边以协助混凝土受压。混凝土保护层又防止了钢筋受火和有害气（液）体的危害。这样钢筋混凝土就发挥了两种不同材料各自的优势，弥补了彼此的不足，因而具有很高的承载能力和较长的耐久性，如图 0-1 所示。

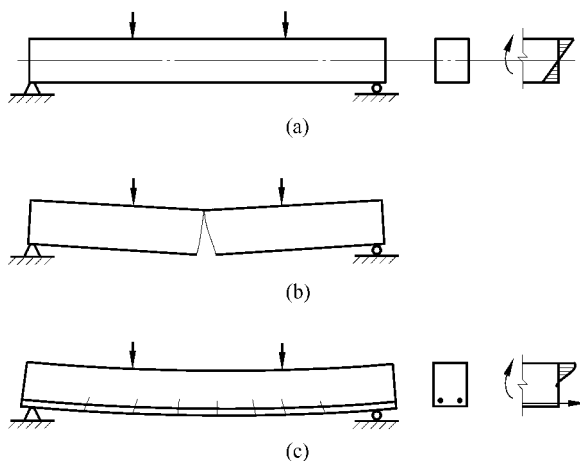


图 0-1 混凝土简支梁破坏示意图

2. 两种性质完全不同的材料能共同工作的原因

(1) 良好的粘结力。水泥胶凝体化学黏着力，混凝土硬化收缩握裹力，钢筋表面刻痕产生的机械咬合力等，都能很好地传递应力。

(2) 有大致相同的线热膨胀系数（混凝土 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ，钢筋 $1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ），能有效抵抗混凝土因温差引起的开裂。

3. 混凝土结构的优缺点

1) 钢筋混凝土

优点：就地取材、耐久性好、刚度大、可模性好。

缺点：自重大、混凝土强度低、易开裂，跨度不能太大。

2) 预应力钢筋混凝土

可克服钢筋混凝土的缺点，但高强材料（高强钢筋、高强钢丝和高强混凝土）造价高、施工难度大、工序多、对技术要求高。

4. 展望

现在用于工程的混凝土强度等级已有 C100，且更高标号的混凝土也在研制中；各种不

同的外加剂(如早强剂、防冻剂、微沫剂、减水剂等)在改变着混凝土的性质;不同的新兴配筋材料(如纤维增强塑料筋、碳纤维筋)、新型配筋形式(预应力混凝土、钢骨混凝土、钢管混凝土)以及各种高强纤维材料与混凝土搅拌形成的纤维混凝土(如钢纤维混凝土、高强塑料纤维混凝土)已先后面世。以上种种都极大地提高了混凝土结构的抗压、抗拉、抗剪、抗裂、抗疲劳、抗冲击等性能,减轻自重,增加延性。可以预料,混凝土结构在未来建筑中将发挥越来越重要的作用。

第 1 章

建筑结构设计的基本原则

本章学习要点

- (1) 理解结构的功能、可靠度、安全等级、设计使用年限、荷载的不同代表值以及其用处等概念；
- (2) 熟悉两种极限状态问题的区分，极限状态设计表达式，最好能记住承载能力极限状态的主要分项系数。

1.1 概述

随着社会生产力的发展、技术的进步，建筑结构设计与其他领域一样，也经历了由低级到高级，由知之不多到知之较多的过程；其核心都是围绕如何设计与施工才能保证建筑结构既安全可靠，又经济合理。

最早的房屋建筑没有什么设计计算，只是靠工匠们的经验建造。18 世纪工业革命以后，人们开始用以弹性理论为基础的许用应力法进行结构设计，安全系数根据经验来确定。这种方法对于砖、石、铸铁等脆性材料基本适用，但对钢材、钢筋混凝土就不适用了，因为它们有明显的弹塑性性能。仅按弹性设计没有充分利用其承载能力，因此是很不经济的。而且过去也没有可靠性的概念，因而可能出现较大荷载作用于材料抗力较小的小概率事件，这种设计有多高的可靠度无从谈起。

新中国成立以后，我国建筑结构设计理论有了长足的发展。但在 20 世纪 80 年代以前，建筑结构设计理论在不同材料构件设计中采用了不同的设计方法。如砌体结构采用了总安全系数法，钢筋混凝土结构采用了半经验、半统计的单一安全系数极限状态设计法。在同一幢建筑物中，建筑结构的可靠性很难明确表述。

20 世纪 80 年代以后，国际上采用概率理论来研究和解决结构可靠度问题，并在统一各种结构基本设计原则方面取得了显著的进展。在学习国外科研成果和总结我国工程实践经验的基础上，我国于 1984 年颁布试行《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—1984)(以下简称

原《统一标准》),也是采用以概率理论为基础的极限状态设计法。原《统一标准》把概率方法引入到工程设计中,从而使结构设计可靠度具有比较明确的物理意义,使我国的建筑结构设计基本原则更为合理,并开始趋向统一。原《统一标准》的应用是我国在建筑结构设计概念上的重大变革,对提高建筑结构设计规范的质量和逐步形成完整的体系起到了重大的推动作用。

近年来,我国对原《统一标准》进行了修订,2002年颁布了《建筑结构可靠度设计统一标准》(GBJ 50068—2002)(以下简称新《统一标准》),将我国建筑结构可靠度设计提高到一个新的水平。本书介绍的建筑结构设计方法,就是按新《统一标准》中近似概率理论为基础的极限状态设计法;即规范采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,以可靠指标度量结构构件的可靠度,采用分项系数的设计表达式进行设计。

1.2 结构的功能和极限状态

1. 结构的功能

从事建筑结构设计的基本目的是在一定经济条件下,使结构在预定的使用期限内,能满足设计所预期的各种功能要求。设计应明确结构的用途,在设计使用年限内未经技术鉴定或设计许可,不得改变结构的用途和使用环境。结构的功能要求包括安全性、适用性和耐久性。

(1) 安全性。要求能够承受正常施工和正常使用时可能出现的各种作用(例如,荷载、温度、地震等),以及在偶然事件发生时及发生后,结构仍能保持必需的整体稳定性,即结构仅产生局部损坏而不致发生连续倒塌。

(2) 适用性。要求在正常使用时具有良好的工作性能(例如,不发生影响使用的过大变形或振幅;不发生过宽的裂缝)。

(3) 耐久性。要求在正常维护下具有足够的耐久性,不发生锈蚀和风化现象,能够达到设计使用年限。

2. 结构的极限状态

1) 承载能力极限状态

承载能力极限状态,顾名思义是指已经达到结构或构件承载能力极限时的状态;超过这个极限就会出现强度破坏、疲劳破坏或整体发生倾覆破坏。总之,结构或构件超过承载能力极限状态后,结构或构件就不能满足安全性的要求。在承载能力极限状态时,要用荷载效应的设计值和材料强度的设计值来计算,使荷载效应的不利组合不超过结构抗力的不利组合。

2) 正常使用极限状态

正常使用极限状态,即超过这种状态则结构或构件就不能正常使用(虽然已经满足承载能力极限状态),它是指对应于结构或构件达到正常使用或耐久性能的某项规定的极限值。如影响正常使用或外观的过大变形、局部损坏(包括裂缝)、振动或其他特定状态。超过了正常使用极限状态,结构或构件就不能保证适用性和耐久性的功能要求。在正常使用极限状态下,使用荷载相应的标准组合、考虑荷载长期作用的标准组合和准永久组合来验算结构或

构件的边缘应力、挠度或裂缝宽度。

结构或构件按承载能力极限状态进行计算后,还应根据设计状况,按正常使用极限状态进行验算。

1.3 结构的可靠度和极限状态方程

1. 作用效应和结构抗力

任何结构或结构构件中都存在对立的两个方面:作用效应 S 和结构抗力 R 。这是结构设计中必须解决的一对矛盾。

作用效应 S 是指作用引起的结构或构件的内力、变形和裂缝等。

结构抗力 R 是指结构或构件承受作用效应的能力,如结构或构件的承载力、刚度和抗裂度等。它主要与结构构件的材料性能和几何参数以及计算模式的精确性有关。

2. 结构的可靠性和可靠度

结构或构件在规定的时间内、规定的条件下完成预定功能的可能性,称为结构的可靠性。结构的作用效应小于结构抗力时,结构处于可靠工作状态。反之,结构处于失效状态。

由于作用效应和结构抗力都是随机的,因而结构不满足或满足其功能要求的事件也是随机的。一般把出现前一事件(不满足其功能要求)的概率称为结构的失效概率,记为 P_f ;把出现后一事件(满足其功能要求)的概率称为可靠概率,记为 P_s 。

结构的可靠概率亦称结构可靠度。更确切地说,结构在规定的时间内、规定的条件下,完成预定功能的概率称为结构可靠度。由此可见,结构可靠度是结构可靠性的概率度量。

结构的可靠概率和失效概率是互补的,即 $P_f + P_s = 1$ 。因此,结构可靠性也可用结构的失效概率来度量。目前,根据国际惯例和习惯,用结构的失效概率来度量结构的可靠性。

3. 设计基准期和设计使用年限

1) 设计基准期

必须指出,结构的可靠度与使用期有关。这是因为设计中所考虑的基本变量,如荷载(尤其是可变荷载)和材料性能等,大多是随时间而变化的,因此,在计算结构可靠度时,必须确定结构的使用期,即设计基准期。设计基准期是为确定可变作用及与时间有关材料性能等取值而选用的时间参数(我国取用的设计基准期为50年)。还需说明,当结构的使用年限达到或超过设计基准期后,并不意味着结构立即报废,而只意味着结构的可靠度将逐渐降低。

2) 设计使用年限

设计使用年限是设计规定的一个期限,在这一规定的时期内,结构或构件只需进行正常的维护(包括必要的检测、维护和维修),而不需进行大修就能按预期目的使用,完成预期的功能,即结构在正常设计、正常施工、正常使用和维护下所应达到的使用年限。结构的设计使用年限应按表1-1采用。若建设单位提出更高要求,也可按建设单位的要求确定。

表 1-1 设计使用年限分类

类 别	设计使用年限/年	示 例
1	1~5	临时性建筑
2	25	易于替换的结构构件
3	50	普通房屋和构筑物
4	≥100	纪念性建筑和特别重要的建筑结构

4. 极限状态方程

结构的极限状态可用极限状态方程来表示。当只有作用效应 S 和结构抗力 R 两个基本变量时,可令

$$Z = R - S \quad (1-1)$$

显然,当 $Z > 0$ 时,结构可靠;当 $Z < 0$ 时,结构失效;当 $Z = 0$ 时,结构处于极限状态。 Z 是 S 和 R 的函数,一般记为 $Z = g(S, R)$,称为极限状态函数,也称功能函数。相应的, $Z = g(S, R) = R - S = 0$,称为极限状态方程。于是结构的失效概率为

$$P_f = P[Z = R - S < 0] = \int_{-\infty}^0 f(Z) dZ \quad (1-2)$$

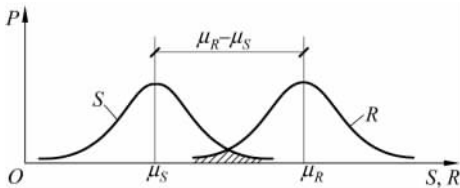
图 1-1 S, R 的概率密度分布曲线

图 1-1 中所示的 S 和 R 的概率密度分布曲线,作用效应分布的上尾部分和结构抗力分布的下尾部分相重合,说明在较弱的构件上可能出现大于其结构抗力 R 的作用效应 S ,导致结构失效。

1.4 可靠指标和目标可靠指标

1. 可靠指标

如果已知 S 和 R 的理论分布函数,则可由式(1-2)求得结构失效概率 P_f 。由于 P_f 的计算在数学上比较复杂以及目前对于 S 和 R 的统计规律研究深度还不够,要按上述方法求得失效概率是有困难的。因此,新《统一标准》采用了可靠指标 β 来代替结构失效概率 P_f 。结构的可靠指标 β 是指 Z 的平均值 μ 与标准差 σ 的比值,即

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \quad (1-3)$$

β 与 P_f 具有一定的对应关系。表 1-2 表示了 β 与 P_f 在数值上的对应关系。

表 1-2 可靠指标 β 与失效概率 P_f 的对应关系

β	2.7	3.2	3.7	4.2
P_f	3.4×10^{-3}	6.8×10^{-4}	1.0×10^{-4}	1.3×10^{-5}

可以证明,假定 S 和 R 是互相独立的随机变量,且都服从于正态分布,则极限状态函数 $Z = R - S$ 亦服从正态分布,于是可得

$$\begin{aligned}\mu_Z &= \mu_R - \mu_S \\ \sigma_Z &= \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}\end{aligned}$$

则

$$\beta = (\mu_R - \mu_S) / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (1-4)$$

式中： μ_Z, σ_Z ——结构构件作用效应的平均值和标准差；

μ_R, σ_R ——结构构件抗力的平均值和标准差。

由式(1-4)可看出,可靠指标 β 不仅与作用效应及结构抗力的平均值有关,而且与两者的标准差有关,见图1-2。 μ_R 与 μ_S 相差越大, β 也越大,结构越可靠,这与传统的安全系数的要领是一致的;在 μ_R 和 μ_S 固定的情况下, σ_R 和 σ_S 越小,即离散性越小, β 就越大,结构越可靠,这在传统的安全系数法中是无法反映的。

2. 目标可靠指标和安全等级

在解决可靠性的定量尺度(即可靠指标)后,另一个必须解决的重要问题是选择结构的最优失效概率作为设计依据的可靠指标,即目标可靠指标,以达到安全与经济上的最佳平衡。

根据对各种荷载效应组合情况以及各种结构构件大量的计算分析后,新《统一标准》规定,对于一般工业与民用建筑,当结构构件属延性破坏时,目标可靠指标 β 取为3.2。

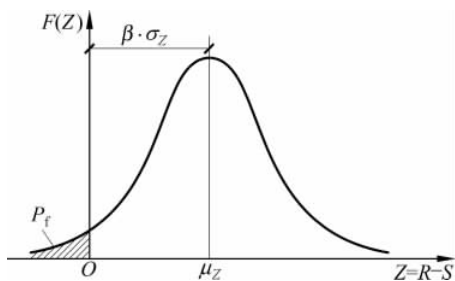


图1-2 β 与 P_f 的关系

此外,新《统一标准》根据建筑物的重要性,即根据结构破坏可能产生的后果(危及人的生命、造成经济损失、产生社会影响等)的严重性,将建筑物划分为三个安全等级;同时,新《统一标准》规定,结构构件承载能力极限状态的可靠指标不应小于表1-3的规定。由表1-3可见,不同安全等级之间的 β 值相差0.5,这大体上相当于结构失效概率相差一个数量级。

表1-3 建筑结构的等级及结构构件承载能力极限状态的目标可靠指标

建筑结构的 安全等级	破坏后果	建筑物类型	结构构件承载力极限状态的目标可靠指标	
			延性破坏	脆性破坏
一级	很严重	重要的建筑	3.7	4.2
二级	严重	一般的建筑	3.2	3.7
三级	不严重	次要的建筑	2.7	3.2

注:(1)延性破坏是指结构构件在破坏前有明显的变形或其他预兆;脆性破坏是指结构构件在破坏前无明显变形或其他预兆。

(2)当承受偶然作用时,结构构件的可靠指标应符合专门规范的规定。

(3)当有特殊要求时,结构构件的可靠指标不受本表限制。

建筑物中各类结构构件的安全等级宜与整个结构的安全等级相同,对其中部分结构构件的安全等级,可根据其重要程度适当调整,但不得低于三级。

1.5 极限状态设计表达式

根据上述规定的目标可靠指标,即可按照结构可靠度的概率分析方法进行结构设计。但是,直接采用目标可靠指标进行设计的方法过于烦琐,计算工作量很大。为了实用上的简便,并考虑到工程技术人员的习惯,新《统一标准》采用了以基本变量(荷载和材料强度)标准值和相应的分项系数来表示的设计表达式,其中,分项系数是按照目标可靠指标,并考虑工程经验,经优选确定的,从而使实用设计表达式的计算结果近似地满足目标可靠指标的要求。

1. 承载能力极限状态设计表达式

任何结构构件均应进行承载力设计,以确保安全。承载能力极限状态设计表达式为

$$\gamma_0 S \leq R \quad (1-5)$$

$$R = R(f_c, f_s, a_k \cdots) / \gamma_{Rd} \quad (1-6)$$

式中: γ_0 ——结构构件的重要性系数,对安全等级为一级或设计使用年限为 100 年及以上的结构构件,不应小于 1.1;对安全等级为二级或设计使用年限为 50 年的结构构件,不应小于 1.0;对安全等级为三级或设计使用年限为 5 年及以下的结构构件,不应小于 0.9;在抗震设计中,不考虑结构构件的重要性系数;

S ——承载能力极限状态的荷载效应(内力)组合的设计值,按《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)和现行国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)的规定进行计算;

R ——结构构件的承载力设计值,在抗震设计时,应除以承载力抗震调整系数 γ_{RE} ;

$R(\cdot)$ ——结构构件的承载力函数;

f_c, f_s ——分别为混凝土、钢筋强度设计值;

a_k ——几何参数标准值,当几何参数的变异性对结构性能有明显的不利影响时,应另增减一个附加值;

γ_{Rd} ——结构构件的抗力模型不定性系数;静力设计值取 1.0,对不确定性较大的结构构件根据具体情况取大于 1.0 的数值;抗震设计应用承载力抗震系数 γ_{RE} 代替 γ_{Rd} 。

对于承载能力极限状态,结构构件应按荷载效应的基本组合(永久荷载+可变荷载)进行计算。

对于基本组合,其内力组合设计值可按式(1-7)和式(1-8)中最不利值确定:

由可变荷载效应控制的组合

$$\gamma_0 S = \gamma_0 \left(\gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik} \right) \quad (1-7)$$

由永久荷载效应控制的组合

$$\gamma_0 S = \gamma_0 \left(\gamma_G S_{Gk} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik} \right) \quad (1-8)$$

按上述要求,在设计排架和框架结构时,往往是相当烦琐的。因此,对于一般排架和框