

第一章 绪论

1.1 混凝土结构的一般概念

1.2 混凝土结构的发展与应用概况

1.3 混凝土结构的基本设计方法

1.4 本课程的特点及学习方法建议

§ 1.1 混凝土结构的一般概念

- 1.1.1 混凝土结构的定义与分类
- 1.1.2 钢筋混凝土产生的原因
- 1.1.3 钢筋与混凝土共同工作的基础
- 1.1.4 钢筋混凝土结构的优缺点

1.1.1 混凝土结构的定义与分类

- 定义：混凝土结构——以混凝土为主要材料制成的结构。

混凝土结构有时亦称钢筋混凝土结构，前者是广义，后者有一定狭义

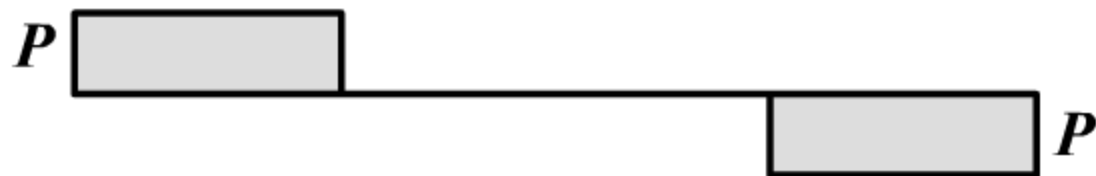
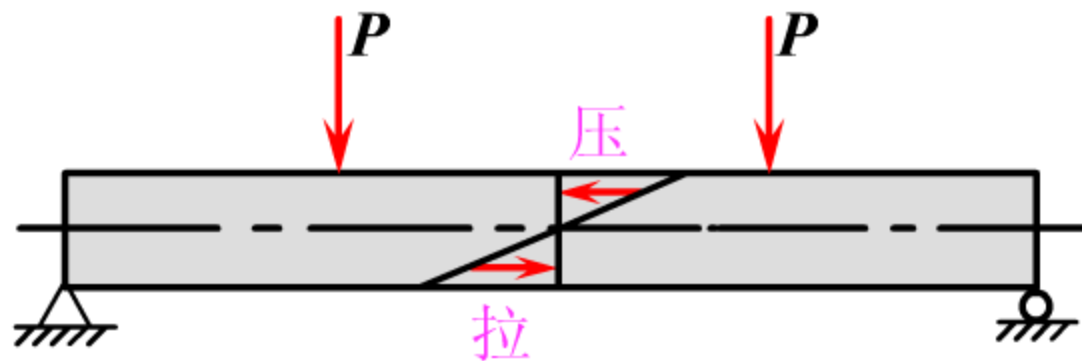
混凝土结构分类：

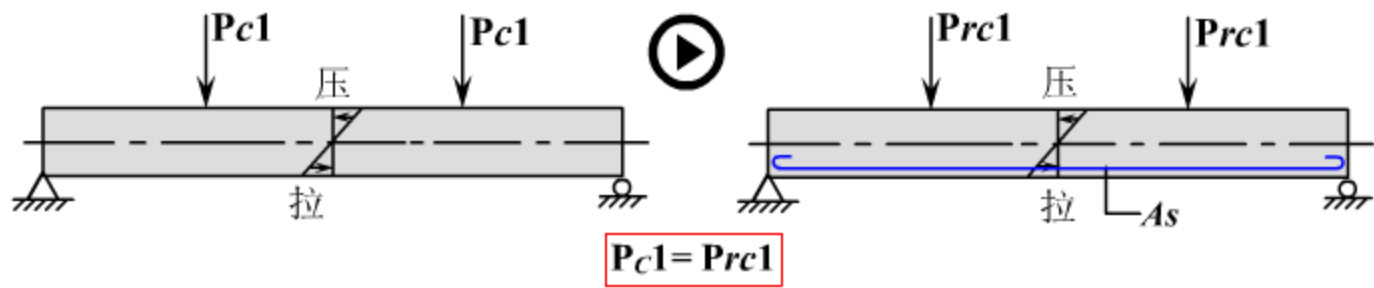
- 配筋混凝土
 - 配置受力钢筋、钢骨、钢管的——钢筋混凝土结构
 - 预应力混凝土（配置预应力钢筋形成预应力）
- 素混凝土——无钢筋或不配置受力钢筋
- 本书主要讲述配置受力钢筋为特点的普通钢筋混凝土结构和预应力结构。

1.1.2 钢筋混凝土产生的原因

- 钢筋混凝土——钢筋与混凝土 *有机结合*而成的一种复合结构材料，其主要特点为混凝土受压、钢筋受拉。
- 钢筋混凝土思想第一次的工程实践为——**1849年**法国人朗伯特（**Joseph, lambit**），用水泥砂浆涂抹在铁丝网两面的方法制造了一条小船。

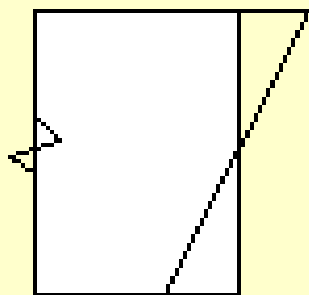
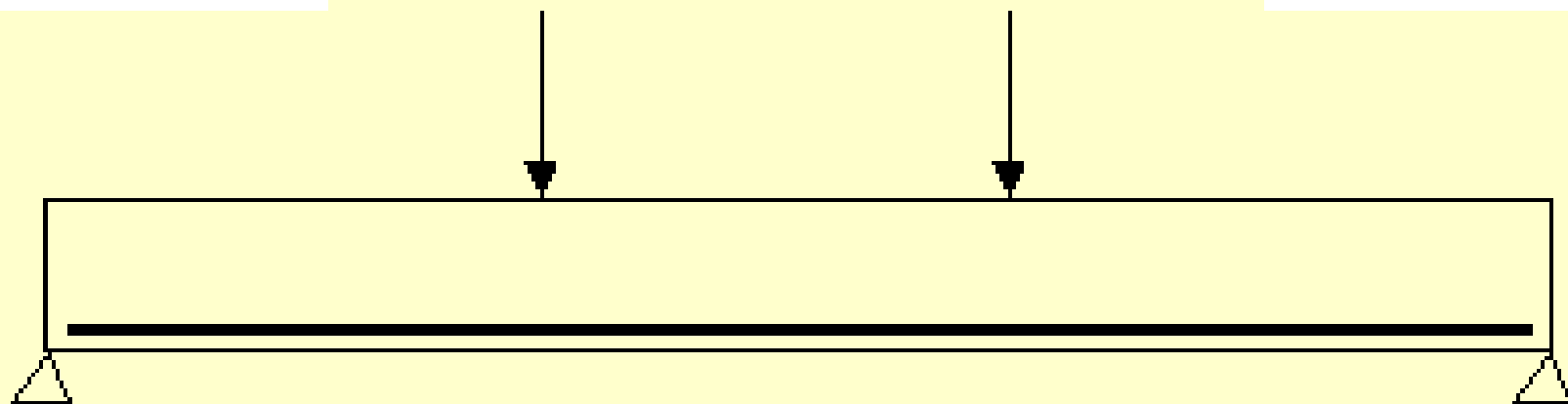
- 世界上第一项有关钢筋混凝土方面的专利权——法国花匠在**1867**年以水泥砂浆涂在铁丝网两面制成的花盆。
- 钢筋混凝土目前也是工程中最常用的结构材料之一，其原因可以从下述简支梁的受力行为与材料间的关系得到初步的答案。



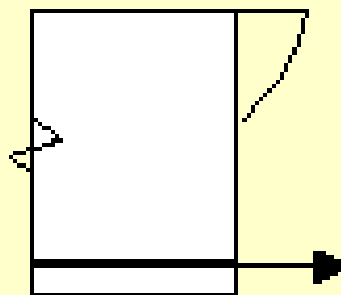


基本工作原理

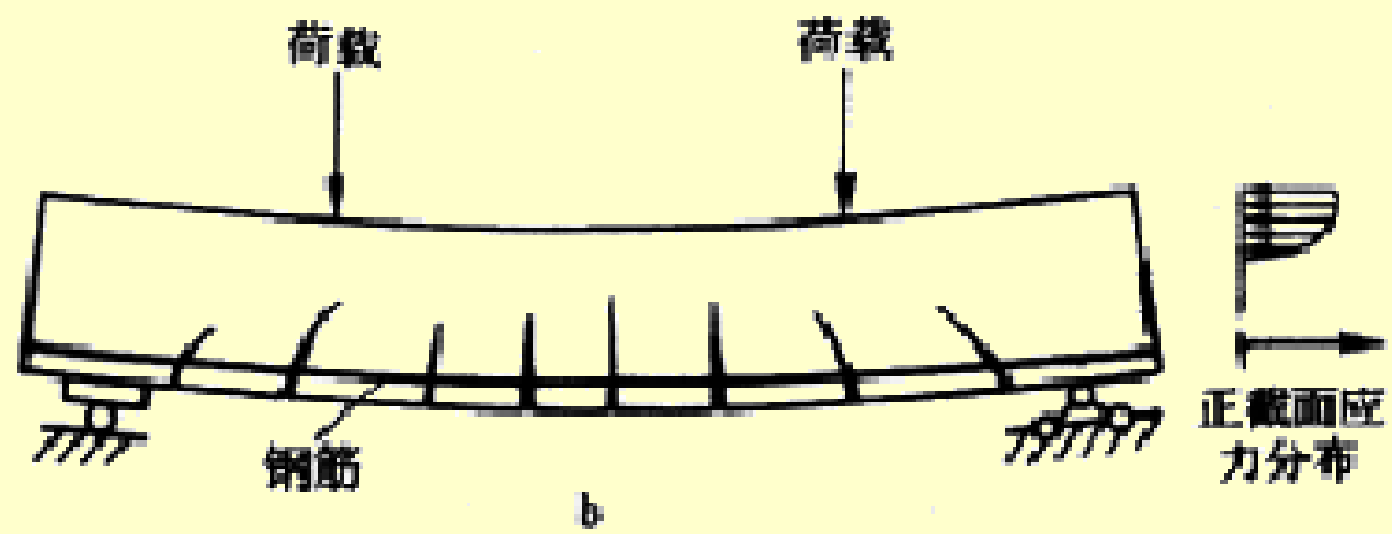
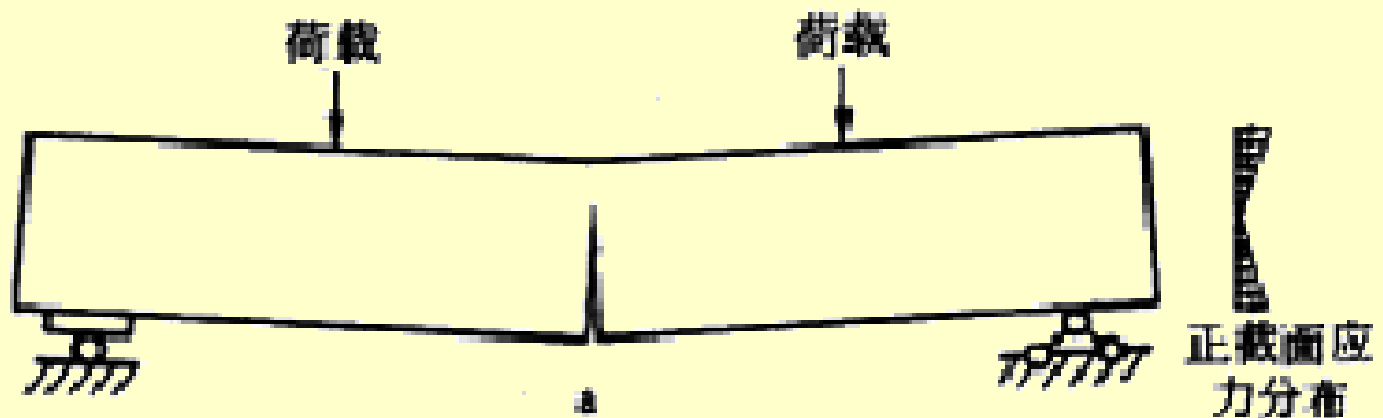
混凝土：抗压强度高，抗拉强度低。
钢筋：抗拉强度高，抗压强度低



无筋梁截面应力



配筋梁开裂后截面应力



两种梁受力情况图

a 素混凝土梁 b 钢筋混凝土梁

结论：

- ①混凝土梁开裂荷载与钢筋混凝土梁相等。
- ②破坏荷载混凝土梁远低于钢筋混凝土梁。
- ③混凝土梁破坏性质为无明显预兆，时间极短的脆性破坏。
- ④钢筋混凝土梁破坏性质为有明显预兆，时间略长的延性破坏。
- ⑤钢筋的作用主要在开裂后表现。

1.1.3 钢筋与混凝土共同工作的基础

- 钢筋与混凝土有机结合，共同工作是可能的。

钢筋和混凝土二者共同工作的基础：

二者之间良好的粘结力

二者相近的温度线膨胀系数

其他方面的互补：

混凝土可保护钢筋免于生锈, 免除相应的维护工作

混凝土脆, 加入钢筋后可提高延性

可提高结构的耐火性

1) 二者材料温度膨胀系数相近，在无温差时不产生过大的温度应力。

温度线膨胀系数 $\alpha = \frac{\Delta L / l_0}{\Delta t}$ ，即单位温度变化时产生的应变变量。

混凝土 $\alpha = 1.0 \times 10^{-5} \sim 1.5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

钢 $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

2) 钢筋与混凝土的良好粘结——保证两者有效共同工作。

3) 混凝土对钢筋保护层作用——保证钢筋防锈蚀及其它腐蚀作用。

钢筋与混凝土之间的粘结作用来源于：

水泥浆胶体与钢筋接触面的化学粘着力；

由于混凝土结硬时收缩将钢筋紧紧握裹而产生的摩擦力；

钢筋表面凹凸不平而产生的机械咬合力。

混凝土的收缩和膨胀（主要是收缩）会受到钢筋的限制而产生应力。当拉应力超过混凝土抗拉强度时会使混凝土开裂。

故应采取措施（减少水灰比、加强振捣和养护等）以减少混凝土的收缩。

1.1.4 钢筋混凝土结构的优缺点

- 1. 优点

- 1) 材料经济、合理
- 2) 耐久性较好
- 3) 耐火性好
- 4) 整体性好
- 5) 可模性好
- 6) 刚度大，阻尼大，有利于控制结构的变形

• 2. 缺点

- 1) 自重大——结构质量系数（单位容重的材料强度）偏低，不适用于大跨、高层结构。措施：轻质、高强混凝土和预应力混凝土。
- 2) 抗裂性差——一般为带裂缝工作，不适用于防裂、防渗、防漏等结构。措施：预应力混凝土。
- 3) 施工较复杂——需支模，工期长，施工受气候影响。措施：混凝土材料制作及施工工艺的改进。
- 4) 隔热和隔声性能差。措施：多孔板、多孔砖

§ 1.2 混凝土结构的发展与应用概况

- 发展历史为**152年**，可分为三个阶段
- 第一阶段（**1850~1920**）
 - 材料特点：强度低。
 - 应用范围：楼板、梁、柱（中小型）。
 - 计算方法：采用弹性理论，允许应力设计方法。

- 第二阶段（1920~1945）

材料特点：强度不断提高，1928年法国弗雷西奈（E·Freyssinet）设计预应力混凝土结构。

应用范围：向中大型结构发展。

计算方法：格沃兹捷夫（A·A·Tbozgel）在50年代提出极限状态方法，并在55年首先在苏联规范上采用。

- 第三阶段（1945~今

材料特点：向高强高性能发展，新型混凝土材料复合结构的产生。

应用范围：大量使用，已应用到超高层、大跨度、特长跨海隧道，高耸结构等特大型工程。

计算方法：电子计算机技术应用推动了钢筋混凝土理论研究，设计方法已发展为以概率理论为基础的极限状态设计方法，三维混凝土结构非线性分析，抗震、抗风等动力计算。

从各个发展方面来看，有以下诸方面：

(1) 材料不断发展

20世纪混凝土强度的发展

60年代	70年度	90年代
28MPa	42MPa	80-100MPa

(2) 预应力混凝土的出现和发展。

(3) 各种轻质混凝土的出现。

(4) 建筑工业化的发展（预制构件，工具式模板，机械化现浇）

(5) 建筑物跨度和高度不断增大。

(6) 特种混凝土的发展（防射线混凝土，聚合物混凝土，纤维混凝土，自应力混凝土，高抗拉强度混凝土等等）

(7) 基本理论和设计方法的发展：

设计方法的发展：弹性（容许应力法）——→ 按破坏阶段设计
——→ 按极限状态设计——→ 近似概率极限状态设计法

计算机有限元分析方法的发展。

多轴应力下的材料本构关系。

混凝土的尺寸效应。

粘结与滑移。

约束对混凝土强度和变形的影响。

断裂力学与损伤力学的应用。

混凝土结构在土木工程各方面的应用：

在房屋工程中：

- 混合结构中的楼板
- 钢筋混凝土梁板柱框架结构
- 单层厂房
- 高层建筑（例：上海金茂大厦）
- 薄壳结构。（例：悉尼歌剧院）

在桥梁工程中：

- 绝大部分中小跨桥梁采用RC 结构建造。（包括RC拱桥）
- 大跨桥梁：当跨度超过500m时 采用钢悬索或钢制斜拉桥，但其桥墩均采用 RC 结构，塔架和桥面结构 也常采用RC结构。

在隧道工程中：

- 铁路隧道
- 公路隧道
- 地铁。
- 高架轻轨交通线

在水利工程中：

水电站

拦洪坝

引水渡槽

污水排水管

特种结构：

电线杆

烟囱

水塔

筒仓

储水池

电视塔

核电站反应堆安全壳

近海采油平台等

我国钢筋混凝土的发展：

本世纪初左右,我国开始有了RC建筑物.中华人民共和国成立以后,RC结构在以下方面得到发展：

在一般民用建筑中采用定型化、标准化的装配式构件。
高层建筑的发展。

大跨度结构的发展。

在工业建筑中广泛采用预制和预应力混凝土

V形折板,双T形板。

从单层厂房发展到多层厂房。

RC在土木工程中得到广泛应用。

如桥梁,水利,隧道,地下结构等。

RC科学研究的发展,有了我国的特色,已达到或接近国际水平。

设计规范及其发展：

解放初期东北：《建筑物结构设计暂行标准》

1955年：《钢筋混凝土结构设计暂行规范》(规结6-55)(破坏阶段设计法)

1966年：《钢筋混凝土结构设计规范》(GBJ21-66)(多系数表达极限状态设计法)

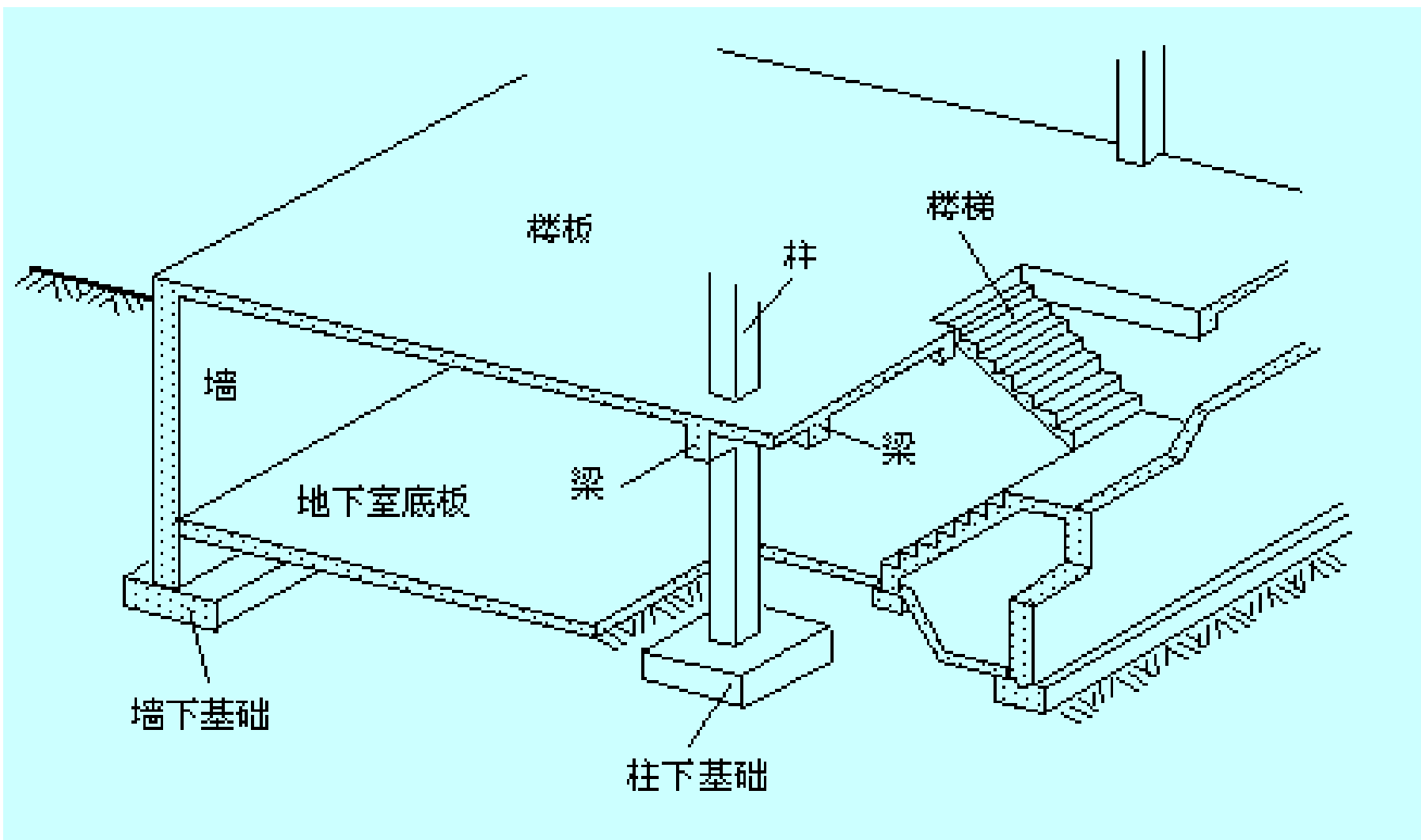
1974年：《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ10-74) (单一安全系数表达的极限状态设计法)

1984年：《建筑结构设计统一标准》(GBJ68-84) (规定统一采用以概率理论为基础的极限状态设计法)

1990年：《混凝土结构设计规范》(GBJ10-89) (以概率理论为基础的极限状态设计法)。

2002年，《混凝土结构设计规范》(GB50010)

混凝土结构的组成



混凝土结构系由不同的混凝土结构构件组合而成的结构体系。这些结构构件主要由板、梁、柱、墙和基础等组成。

以钢筋混凝土结构的多层房屋为例（如图 1-4 所示），其中的主要结构构件为：

钢筋混凝土楼板：主要承担楼板面的荷载和楼板的自重；

钢筋混凝土楼梯：主要承担楼梯面的荷载和楼梯段的自重；

钢筋混凝土梁：主要承担楼板传来的荷载及梁的自重；

钢筋混凝土柱：主要承担梁传来的荷载及柱的自重；

钢筋混凝土墙：主要承担楼板、梁、楼梯传来的荷载，墙体的自重及土的侧向压力；

钢筋混凝土墙下基础：主要承担墙传下的荷载并将其传给地基；

钢筋混凝土柱下基础：主要承担柱传来的荷载并将其传给地基。

现代混凝土结构代表性建筑的介绍

成昆线旧庄河一号桥



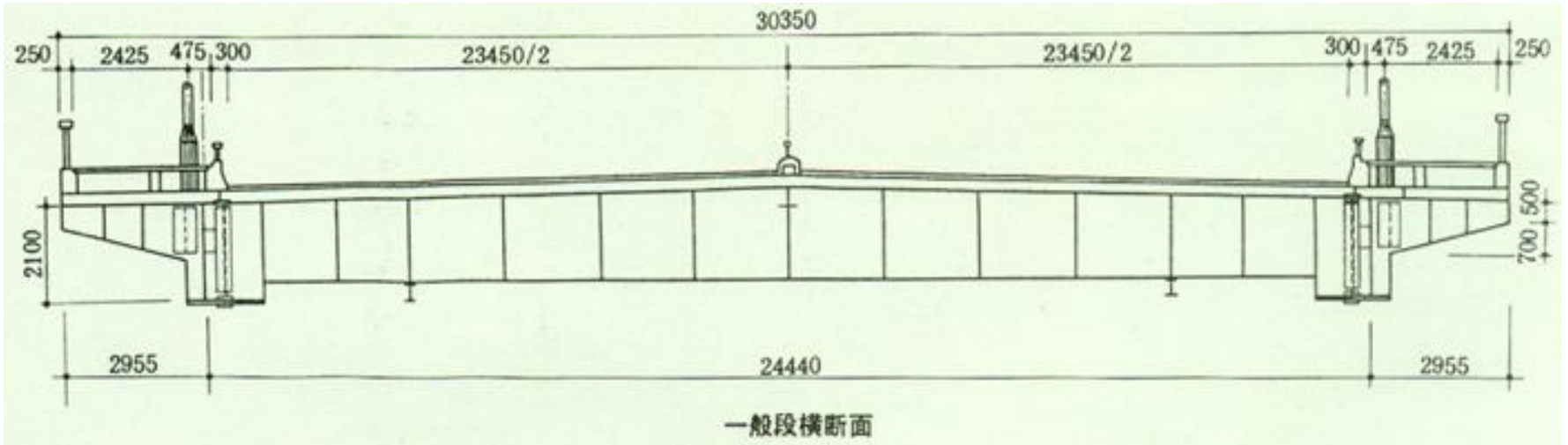
哈尔滨松花江公路桥



南浦大桥



南浦大桥结构



南浦大桥结构



南浦大桥



瑞安飞云江大桥



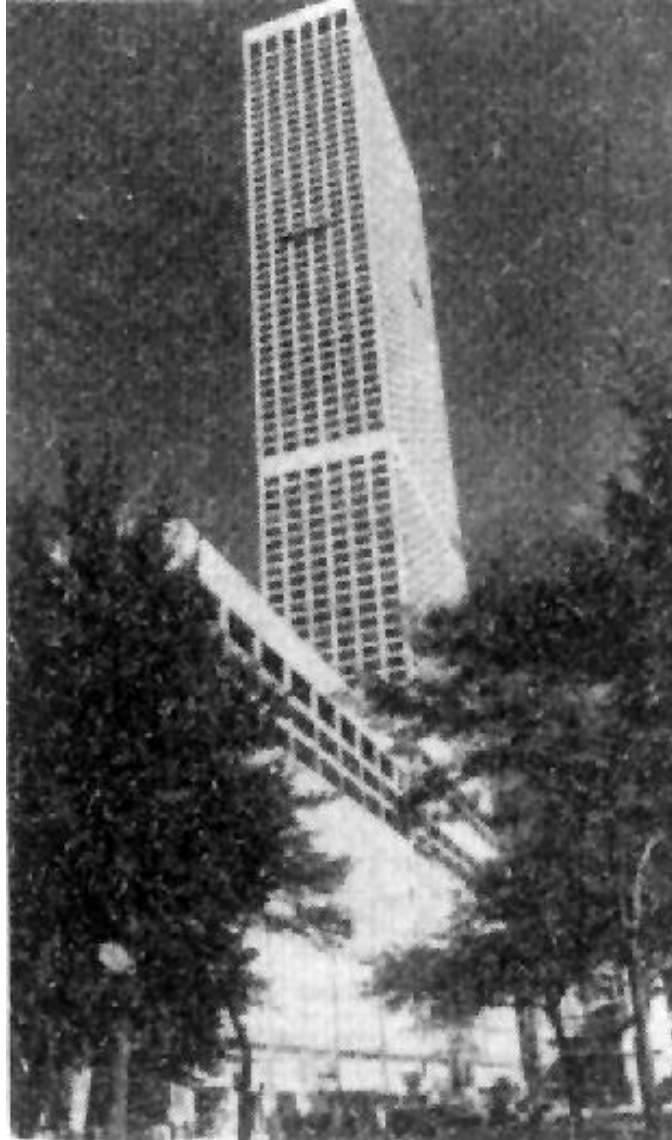
上海漕溪路桥



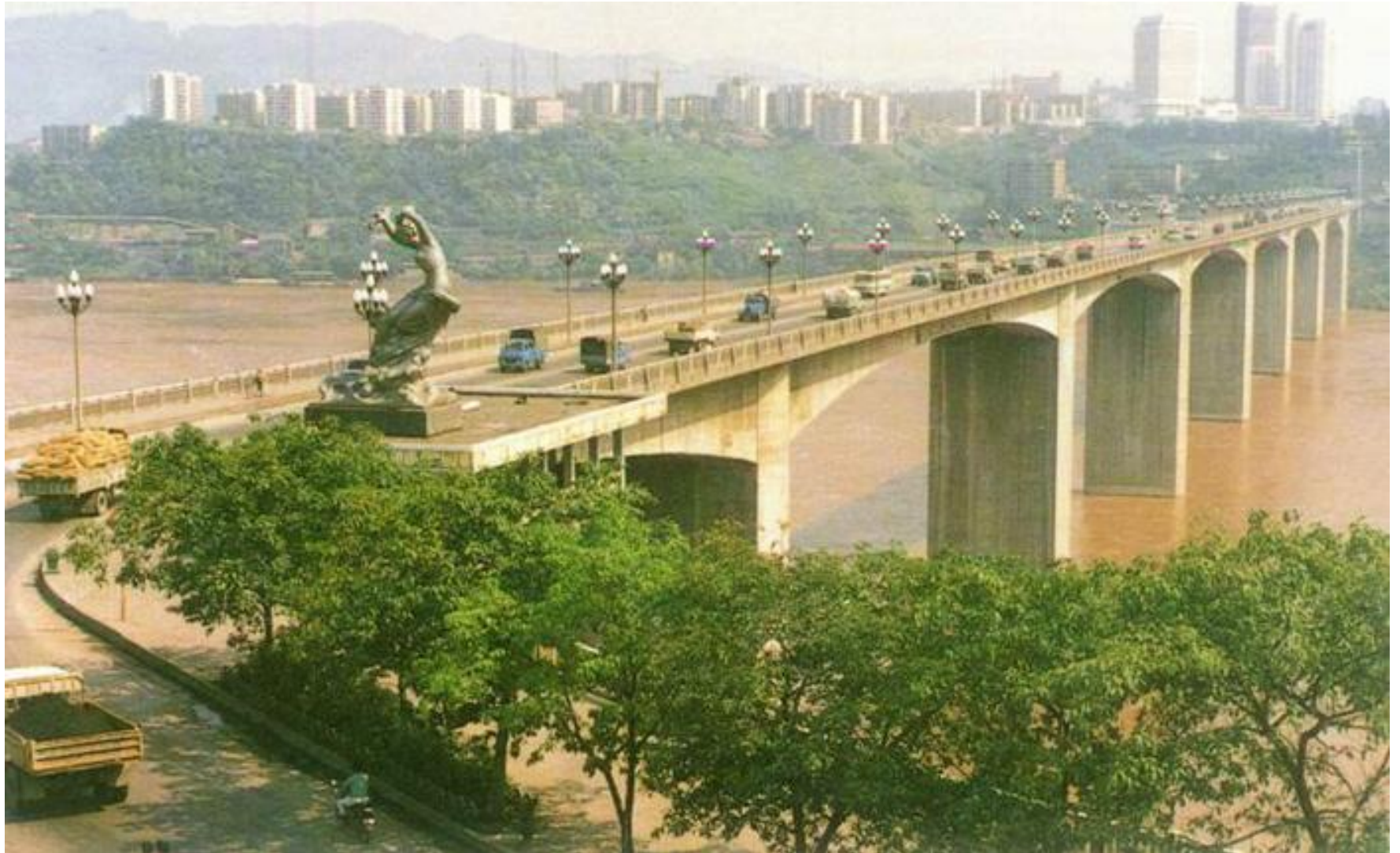
天津永和桥



水塔广场大厦



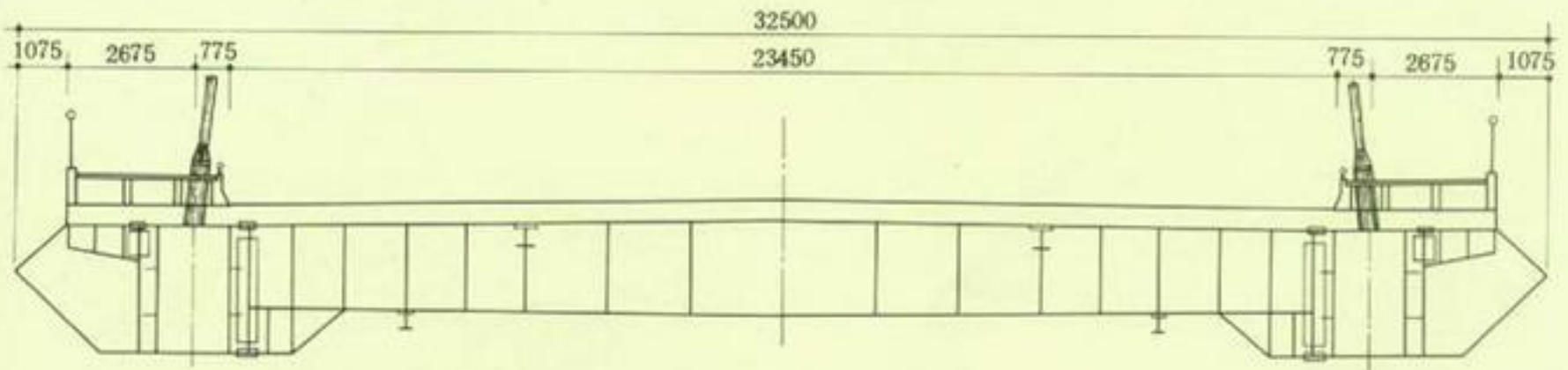
重庆长江大桥



杨浦大桥



杨浦大桥结构

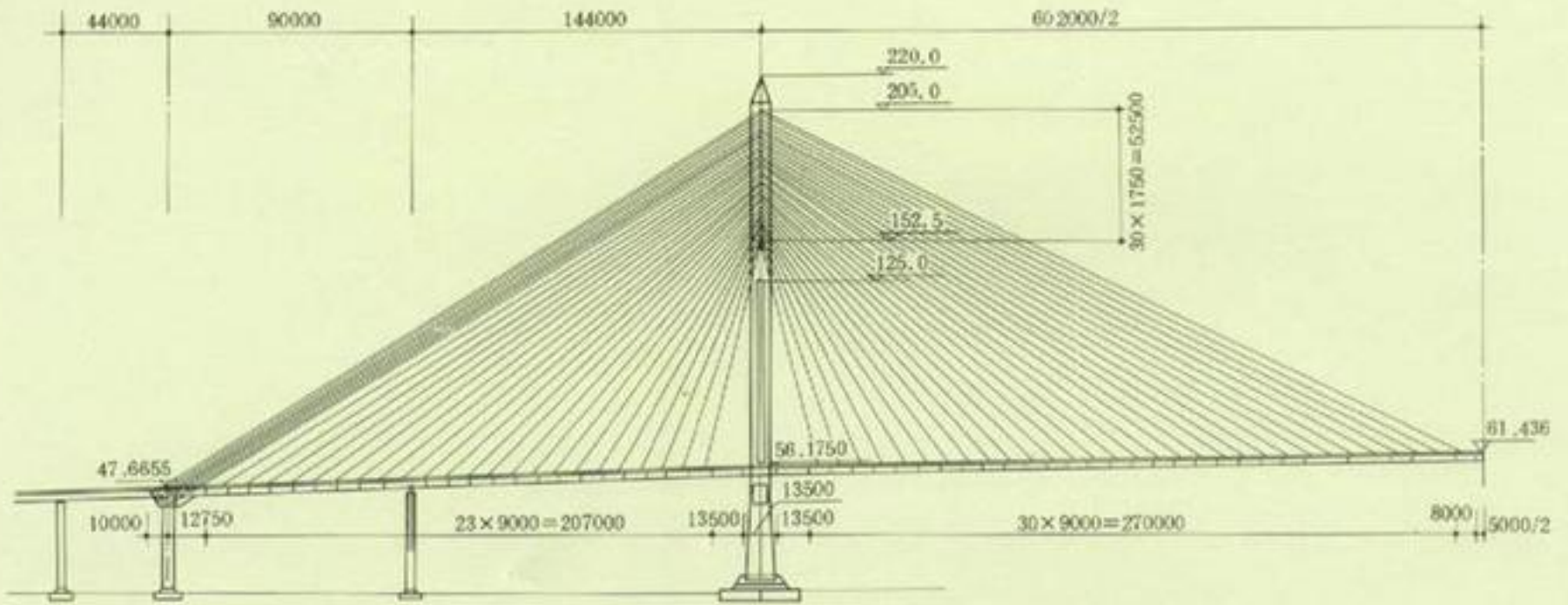


典型断面

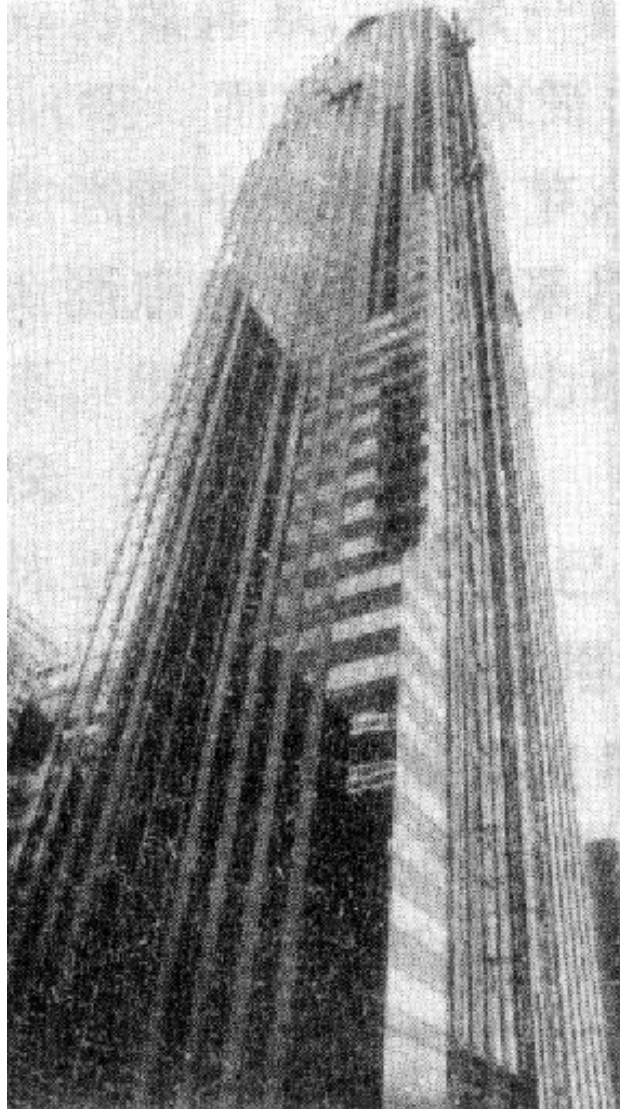
杨浦大桥结构



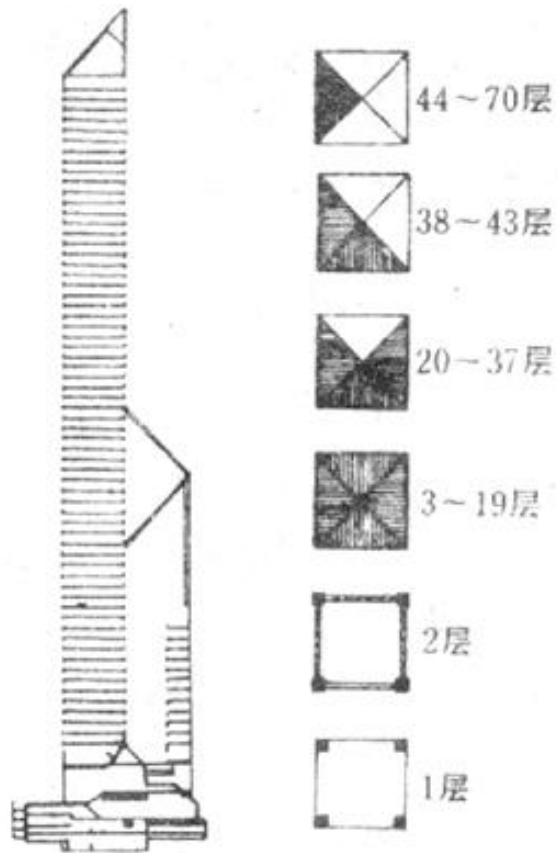
杨浦大桥结构



Two Prudential Plaza



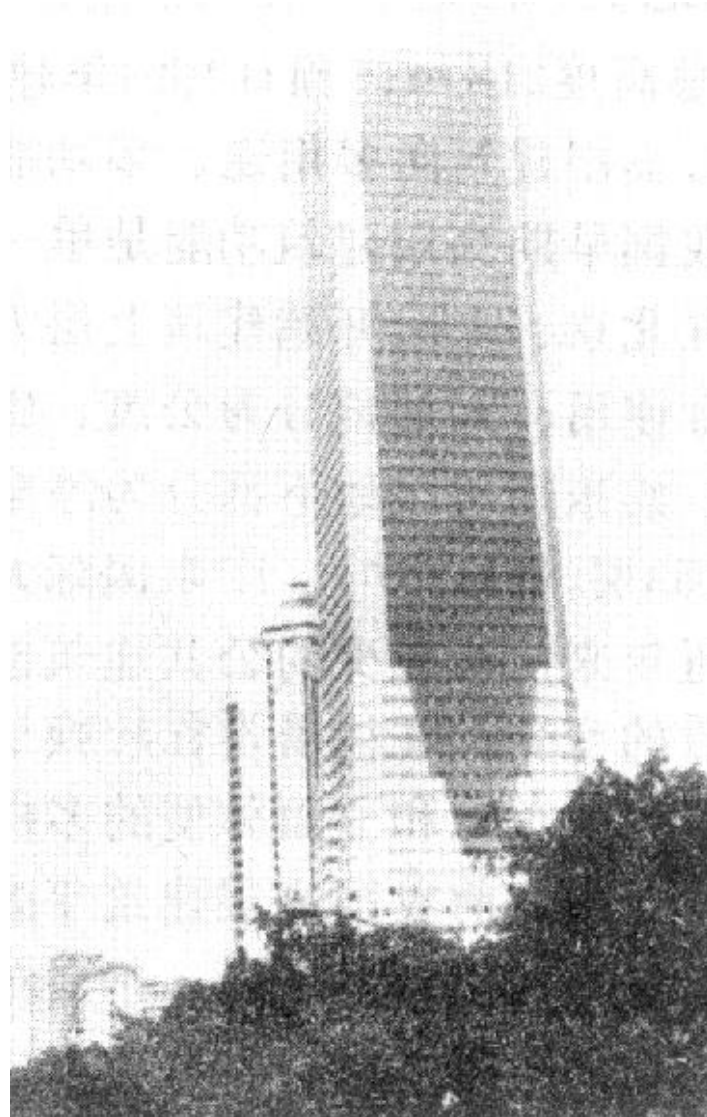
香港中国银行大厦



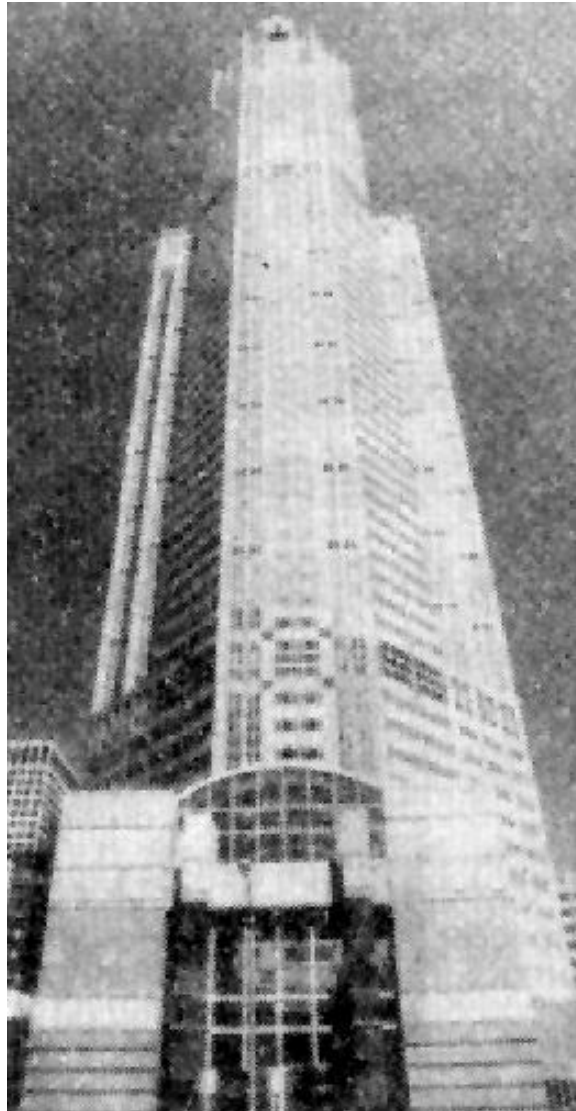
(b)

图 3-59 香港中国银行大厦

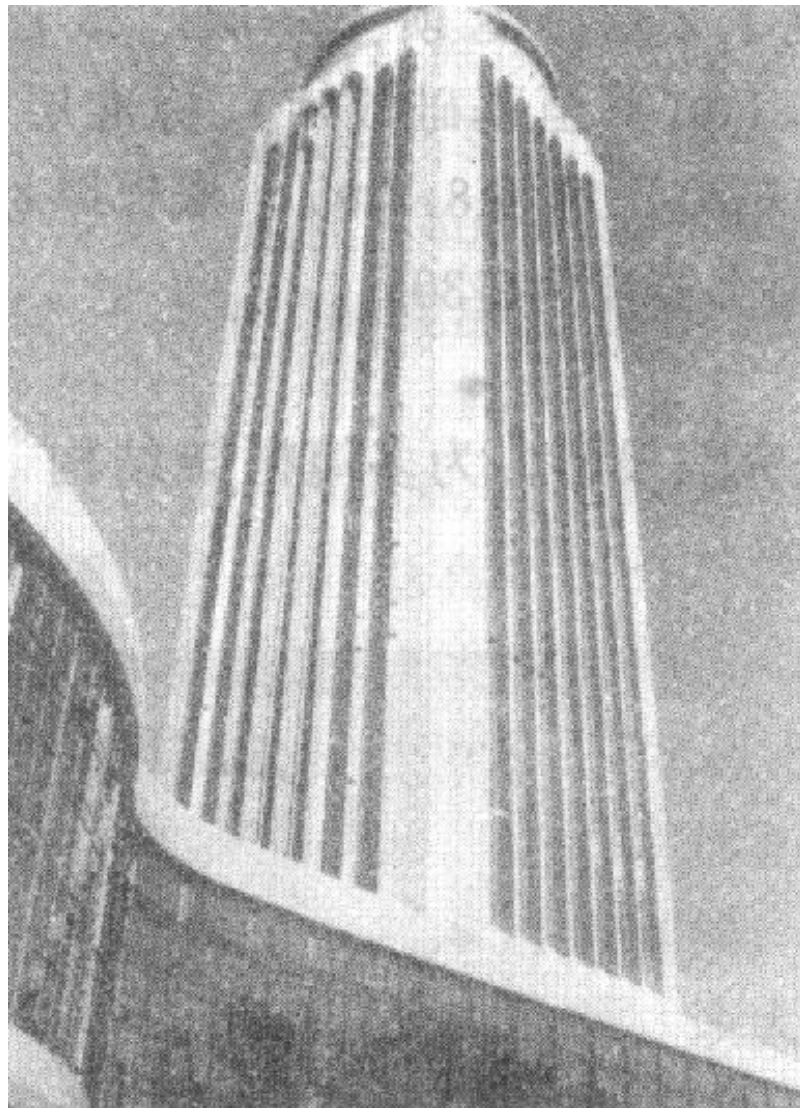
广东国际大厦



威克塔楼



深圳国际贸易中心大厦



混凝土结构的拓展和展望

材料和配筋方式方面的新进展使RC出现新领域：

高性能混凝土结构

纤维增强混凝土结构

钢骨混凝土结构

钢管混凝土结构

钢-混凝土组合结构

高性能混凝土：

即具有高强度、高耐久性、高流动性、并具有抗震、抗渗透、抗爆、抗冲击等多方面优越性能的混凝土

发展高性能混凝土显然是现代结构对材料高性能的要求。

纤维增强混凝土：在混凝土中掺入适当的各种纤维材料而成。

性能：较高的抗拉、抗剪、抗折强度和抗裂、抗冲击、抗疲劳、抗震、抗爆等性能。

所用纤维材料有：

- 钢纤维(较成熟)
- 合成纤维
 - 尼龙基纤维
 - 聚丙烯纤维等
- 玻璃纤维
- 碳纤维

等等。

型钢混凝土结构

形式：

实腹式
空腹式

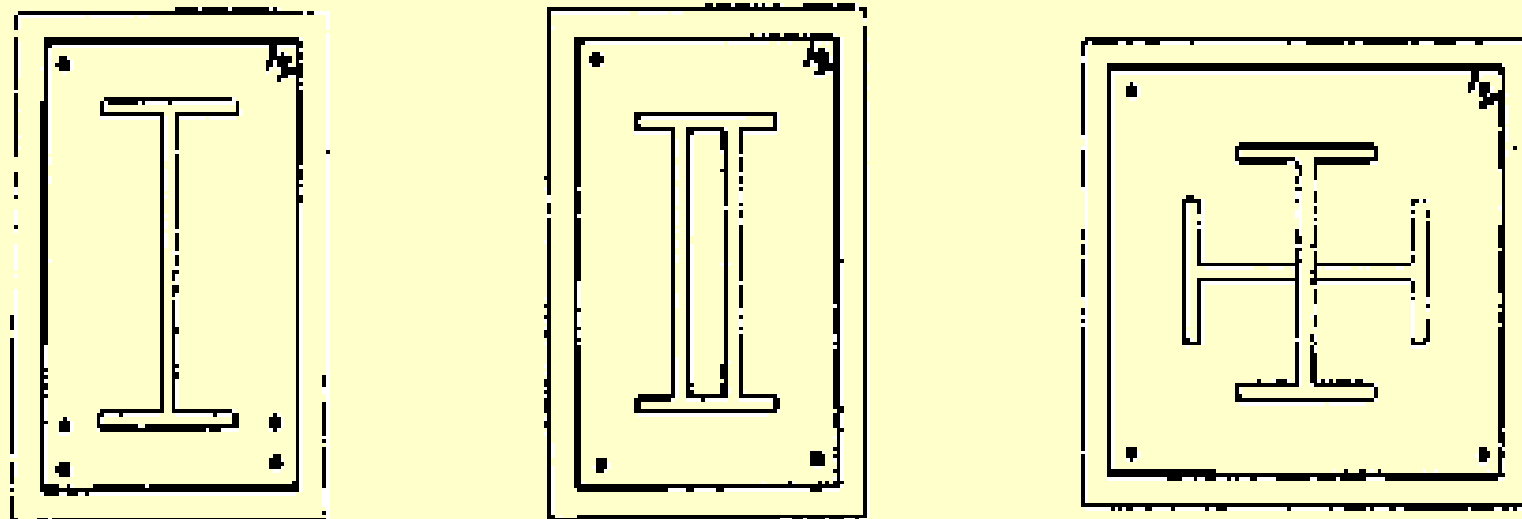


图 1-3 实腹式钢骨混凝土构件截面形式

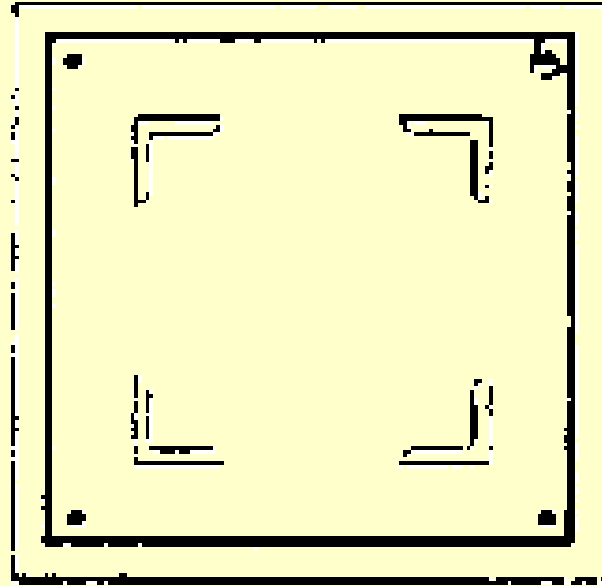


图 1-4 空腹式钢骨混凝土
构件截面形式

特点：

混凝土可防型钢局部屈曲
提高耐火性和耐久性
承载力更大
延性和耗能能力更好

另外还有钢管混凝土结构

1.3 混凝土结构的基本设计方法

- 所谓设计方法就是研究工程设计中的各种不确定性因素，以取得结构设计的安全可靠与经济合理之间的均衡。
- 主要解决的问题：
 - ①明确结构应满足的各种功能要求，对安全可靠标志的定义。
 - ②合理考虑各种不确定性，建立科学的设计方法。
 - ③对荷载、材料强度进行合理取值。

1.3.1 结构的功能要求

1. 安全性

结构应能在预定的设计使用年限内（《规范》规定一般建筑结构为**50**年，但业主也可提出更高的要求，对次要建筑可取**25**年），应能承受正常施工和正常使用时（指不改变结构的使用功能），可能出现的各种荷载，外加变形（如超静定结构的支座不均匀沉降），约束变形（如温度和收缩变形受到约束时）等的作用，以及在偶然事件（如强烈地震、爆炸）发生时和发生后，结构仍能保持必需的整体稳定性，不致发生倒塌。

2. 适用性

结构在正常使用过程中应具有良好的工作性。

3. 耐久性

- 结构在正常维护条件下应有足够的耐久性，完好使用到设计使用年限。

上述三方面功能可以用结构可靠性予以综合概括。

结构可靠性就是指结构在规定的使用期限内和在规定的条件下（正常设计、正常施工、正常使用和维护），完成预定功能（安全性、适用性、耐久性）的能力。

可靠性愈高，造价就愈高，《规范》给出了可靠与经济二者均衡的最低限度。

1.3.2 结构功能的极限状态

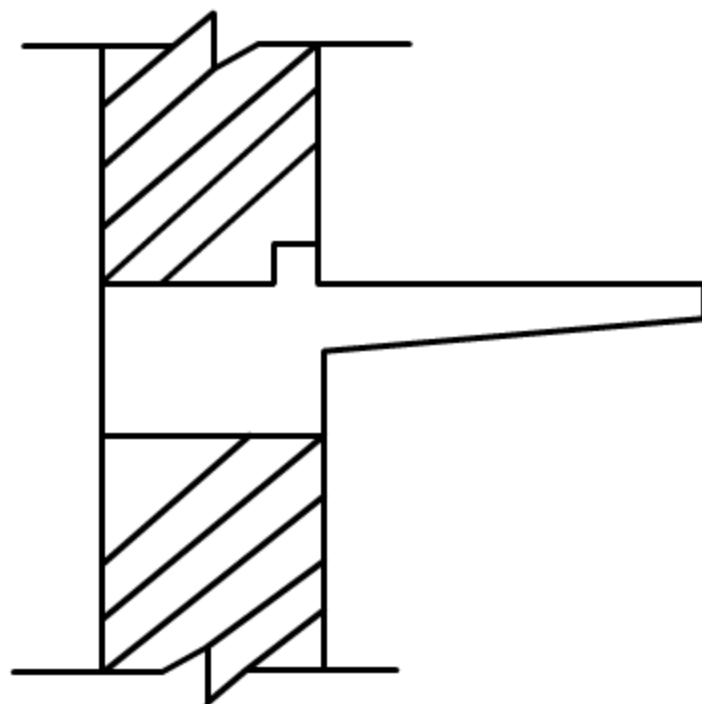
- 整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能满足设计指定的某一功能要求，这个特定状态称为该功能的极限状态，是结构可靠与失效之间的临界状态。
- 《规范》把极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态二类。

1. 承载能力极限状态

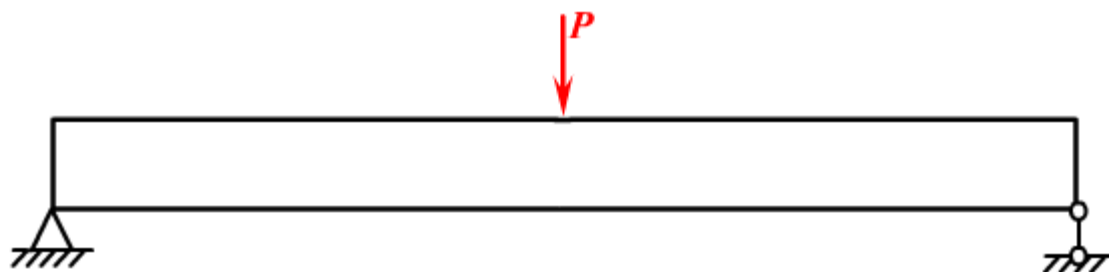
结构或构件达到最大承载能力或者达到不适于继续承载的变形状态，称为承载能力极限状态。超过该极限状态，结构就不能满足安全性要求，当结构或构件出现下列状态之一时，即认为超过了承载能力极限状态。

标志：

- 1) 整个结构或结构的一部分作为刚体失去平衡（如倾覆等）；
- 2) 结构构件或连接因材料强度被超过而破坏（包括疲劳破坏），或因过度的塑性变形而不适于继续承载；
- 3) 结构转变为机动体系；
- 4) 结构或结构构件丧失稳定（如压屈等）。



雨蓬倾覆



钢筋混凝土 { 配筋合适, 强度破坏
配筋过少, 变形过大



桥墩失稳

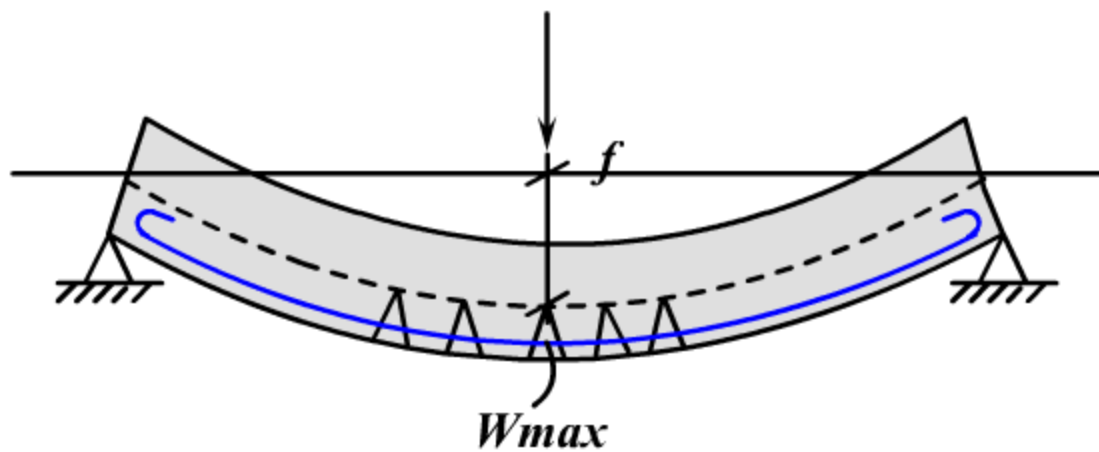


连续梁桥形成机动体系

2. 正常使用极限状态

结构或构件达到正常使用或耐久性能中某项规定限度的状态称为正常使用极限状态。超过该极限状态，结构就不满足规定的适用性和耐久性的功能要求。当结构或结构构件出现下列状态之一时，即认为超过了正常使用极限状态：

- 1) 影响正常使用或外观的变形；
- 2) 影响正常使用或耐久性能的局部损坏（包括裂缝）；
- 3) 影响正常使用的振动；
- 4) 影响正常使用的其它特定状态。



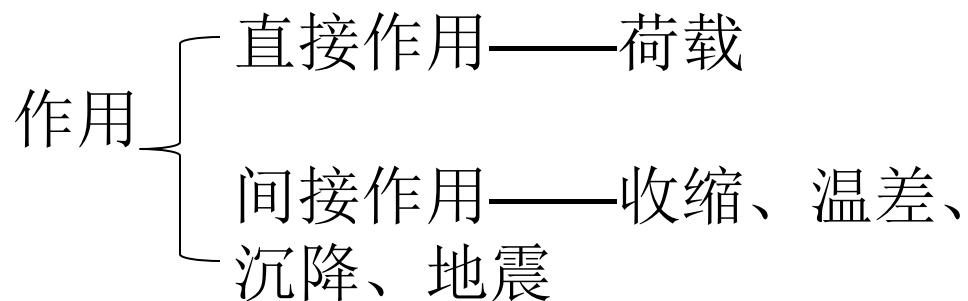
钢筋混凝土梁过大的裂缝和变形

1.3.3 结构上的作用及结构抗力

1. 分类

使结构产生内力或变形的因素称为作用，

按原因分：



按作用时间变异性可分为：

1) 永久作用

在设计基准期内，其作用值不随时间变化，或其变化与平均值相比可忽略不计，如自重、预压应力。

2) 可变作用

在设计基准期内，其作用值随时间变化，或其变化与平均值相比不可忽略不计，如楼面活载、车辆、风载。

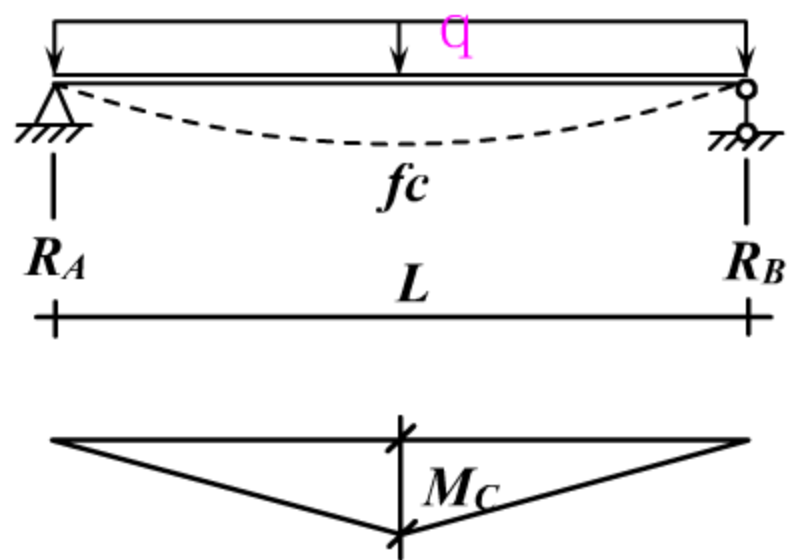
3) 偶然作用

在设计基准期内不一定出现，但一旦出现其作用值很大，且持续时间较短，如、爆炸、撞击。

2. 作用效应S

所谓作用效应是指结构上的作用在结构上产生的内力、支座反力、变形、裂缝等效应的总称。

对于直接作用荷载称为荷载效应，荷载效应的计算由结构力学方法解决；荷载效应一般同荷载值呈线性关系，即荷载效应可用荷载值乘以荷载效应系数方式表示。



$$\left\{ \begin{aligned} M_C &= \frac{1}{8} q L^2 = \frac{1}{8} L^2 \times q = C_1 \times q \\ f_C &= \frac{5 q L^4}{384 E I} = \frac{5 L^4}{384 E I} \times q = C_2 \times q \\ R_A = R_B &= \frac{1}{2} q L = \frac{1}{2} L \times q = C_3 \times q \end{aligned} \right.$$

C_i — 荷大效应系数
 EI — 梁的抗弯刚度

3. 结构抗力R

它是指结构抵抗某功能能力的总称，如抗弯、抗剪、抗压、抗裂度等，结构抗力R则与结构材料截面尺寸、配筋情况等有关，可用下式表示：

$$R = R(f_c, f_y, A, h_0, A_s, \dots)$$

确定结构抗力是本课程的主要内容。

1.3.4 结构设计中不确定性及概率统计中基本概念

- 1.3.4.1 结构设计中的不确定性--随机性
- 1.3.4.2 概率统计的基本概念
- 1.3.4.3 概率密度函数 $f(x)$
- 1.3.4.4 随机变量的平均值、均方差、变异系数
- 1.3.4.5 正态分布

1. 结构设计中的不确定性--随机性

- ◇ 随机性就是事件出现与否上表现出来的不确定性。
- ◇ 结构上的荷载自重、活载均有明显随机性（在大小上）。
- ◇ 由于材质不均匀性，施工工艺差异也会使结构抗力具有明显的随机性，故在设计中必须正确对待随机性，否则会带来不安全性（不可靠），处理随机性问题的工具为概率统计理论。

2. 概率统计的基本概念

1) 随机事件、概率和随机变量

在一定条件下可能出现也可能不出现的事件称为随机事件。

描述随机事件出现与否可能性的量值称为概率，用**P**表示。

由随机事件决定的变量称为随机变量，一般以**x**表示。

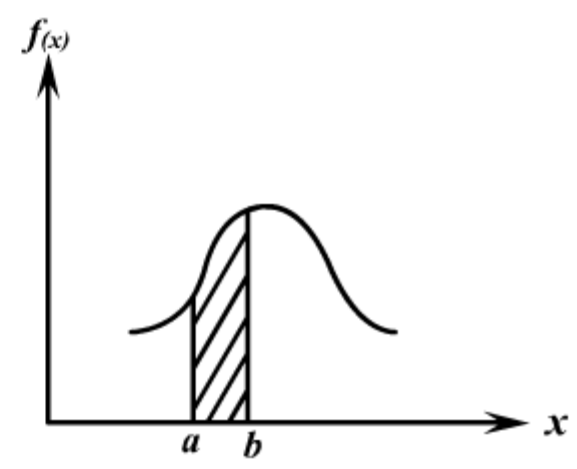
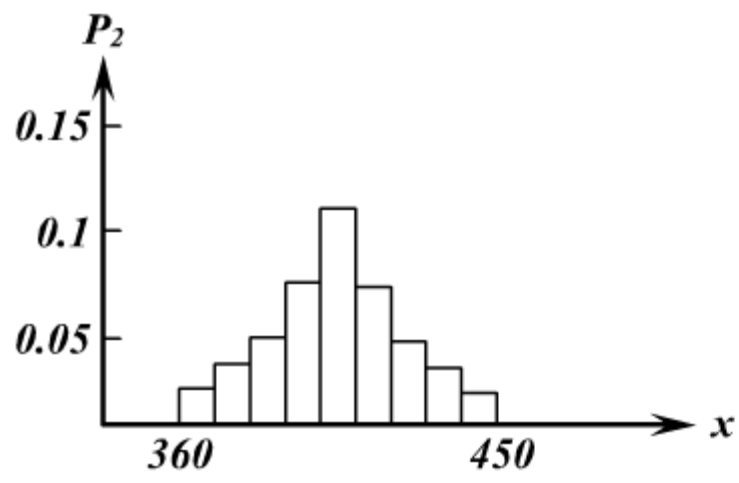
16Mn钢筋的强度有可能在 $360 \sim 450 \text{ N/mm}^2$ 内波动，故其强度值即为随机变量**x**， $X < x$ ($X < 370 \text{ N/mm}^2$) 即为随机事件，该随机事件的概率记为 $P(X < x) = F(x)$ 即概率分布函数

2) 直方图和概率分布曲线

直方图以随机变量 x 为横坐标，以频率 P_i 为纵坐标，描述随机变量出现情况的图形

频率：
$$P_i = \frac{n}{N}$$

概率密度：
$$f_i = \frac{P_i}{\Delta X_i}$$



3. 概率密度函数 $f(x)$

$$P(a < X \leq b) = \int_a^b f(x) dx$$

$$P(a < X \leq b) = F(b) - F(a)$$

若积分上下限变为 $-\infty$ 到 x ，则：

$$P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = F(x) - F(0)$$

4. 随机变量的平均值、均方差、变异系数

1) 平均值 μ

反映大多数值的集中位置，在物理上类似质心或形心。

离散分布随机变量：
$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = \sum_{X_i} X_i \cdot P_i$$

连续分布随机变量：
$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x) dx$$

2) 均方差

反映随机变量对均值 μ 的集中程度，表示数据的离散程度，在物理上类似对自身形心轴的惯性矩。

离散型随机变量: $\sigma_x^2 = \sum_{X_i} (X_i - \mu)^2 P(X_i)$

均方差: $\sigma_x = \sqrt{\sum_{X_i} (X_i - \mu)^2 P(X_i)}$

标准差: $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu)^2}{n-1}}$ 是 σ_x 的无偏估计。

连续型随机变量: $\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx$

3) 变异系数 V

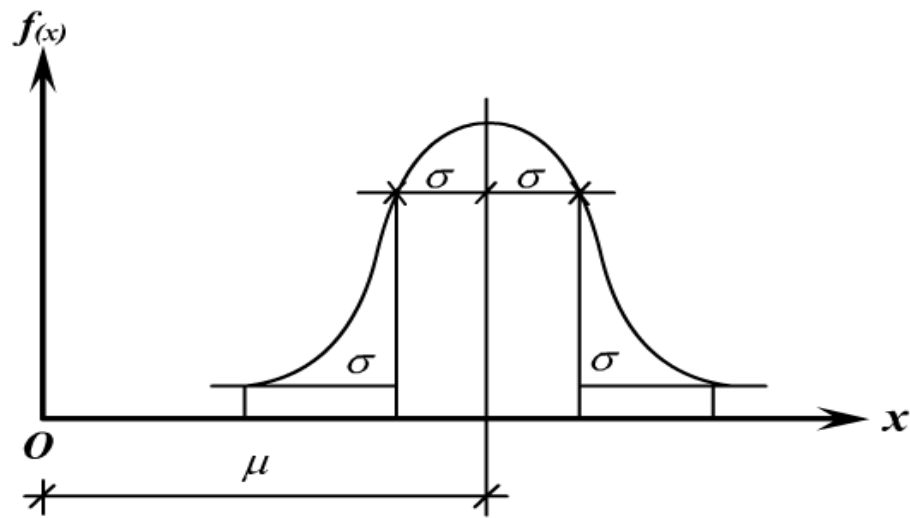
$$V = \frac{\sigma_x}{\mu} \quad \text{——反映相对离散度的指标}$$

5. 正态分布

1) 特征

又称高斯分布，具有如下特征：

- i. 峰值在均值处取得
- ii. 曲线以 $X = \mu$ 左右对称
- iii. 呈钟型分布，且 $X = \mu \pm \sigma$ 为反弯点



2) 概率密度函数

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

分布函数:

$$F(x) = P(X < x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx$$

3) 特征值及保证率

如要求出现的事件不小于或不大于某一个特定值 ($X \geq x_0$ 或 $X < x_0$)，则该特定值 x_0 称为特征值 (或分位值)；而 $X < x_0$ 或 $X \geq x_0$ 事件的概率称为关于 x_0 的保证率，在工程中常用特征值为：

$$\left. \begin{array}{l} X_0 = \mu - \sigma \quad P(X < x_0) = 0.157 \quad P(X \geq x_0) = 0.843 \\ X_0 = \mu + \sigma \quad P(X < x_0) = 0.843 \quad P(X \geq x_0) = 0.157 \end{array} \right\} 1\sigma \text{原则}$$

$$\left. \begin{array}{l} X_0 = \mu - 2\sigma \quad P(X < x_0) = 0.023 \quad P(X \geq x_0) = 0.977 \\ X_0 = \mu + 2\sigma \quad P(X < x_0) = 0.977 \quad P(X \geq x_0) = 0.023 \end{array} \right\} 2\sigma \text{原则}$$

$$\left. \begin{array}{l} X_0 = \mu - 3\sigma \quad P(X < x_0) = 0.001 \quad P(X \geq x_0) = 0.999 \\ X_0 = \mu + 3\sigma \quad P(X < x_0) = 0.999 \quad P(X \geq x_0) = 0.001 \end{array} \right\} 3\sigma \text{原则}$$

$$\left. \begin{array}{l} X_0 = \mu - 1.645\sigma \quad P(X < x_0) = 0.05 \quad P(X \geq x_0) = 0.95 \\ X_0 = \mu + 1.645\sigma \quad P(X < x_0) = 0.95 \quad P(X \geq x_0) = 0.05 \end{array} \right\} 1.645\sigma \text{原则}$$

下限分位值 $\mu - n\sigma$ 用于材料强度；上限分位值 $\mu + n\sigma$ 用于荷载

4) 标准正态分布 $\Phi(y)$

$\mu = 0, \sigma = 1$ 的正态分布为标准正态分布

$$\Phi(y) = \int_{-\infty}^y \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$$

特点:

- i. $\Phi(y)$ 积分值可查表
- ii. $\Phi(0)=0.5$
- iii. $\Phi(-y_1)=1-\Phi(y_1)$

5) 非标准正态变量的标准化

设 x 服从正态分布 (μ, σ)

$$\text{令 } y = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad , \quad \text{则 } \mu(y) = 0, \sigma(y) = 1$$

故

$$F(x_1) = P(X < x_1) = P\left(\frac{X - \mu}{\sigma} < \frac{x_1 - \mu}{\sigma}\right) = P(Y < y_1) = \Phi(y_1)$$

1.3.5 结构设计方法

- 1.3.5.1 容许应力设计法
- 1.3.5.2 破损阶段设计法
- 1.3.5.3 极限状态法
- 1.3.5.4 近似概率的极限状态设计方法
- 1.3.5.5 荷载和材料强度的取值
- 1.3.5.6 实用设计表达式

作为设计要求: $S \leq R$

| |
随机变量

对于随机性的不同考虑，在历史上形成了容许应力设计法、破损阶段设计法、极限状态设计法以及以概率论为基础的极限状态设计法等四种方法。

1. 容许应力设计法

设计表达式:

$$\sigma \leq [\sigma] = \frac{f}{K}$$

(f -材料强度; k -安全系数; $[\sigma]$ -容许应力)

$$\sigma_c = \frac{M}{I_0} \cdot y [\sigma_c] \quad \sigma_s = n \frac{M}{I_0} \cdot y_s \leq [\sigma_x]$$

即认为结构中任一点的应力超过容许应力，结构即失效，反之可靠； σ 的计算按线弹性方法确定，我国《铁路桥规》采用此法。

缺点：

- 1) 实际情况并不是弹性，应力计算不符实际；
- 2) 某点应力达到容许应力，结构并不失效；
- 3) 结构抗力不清楚；
- 4) 无法考虑使用性能要求；
- 5) 安全系数凭主观经验，缺乏对随机性科学研究（经验法）。

2. 破损阶段设计法

设计表达式：
$$M \leq \frac{M\mu}{K}$$

以整个截面达到极限承载能力为依据，可考虑材料的弹塑性以及强度的变化，而且可用荷载试验直接验证，但K仍为经验决定，其它使用性能要求也无法考虑。
(经验法)

3. 极限状态法

规定承载能力极限状态和正常使用极限状态两类，分别进行设计，对于承载能力极限状态，针对荷载和材料变异性的不同，不再采用单一的安全系数，而采用分项安全系数。

设计表达式：
$$M(\sum K_{qi} q_{iK}) \leq Mu \left(\frac{f_{cK}}{K_c}, \frac{f_{sK}}{K_s}, A_s, b, h_0, \dots \right)$$

其中： q_{iK} ——由实测资料给出，具有一定保证率的上限分位值；

K_{qi} ——荷载分项安全系数；

f_{cK}, f_{sK} ——分别是混凝土和钢筋强度实测值统计得到的，具有一定保证率的下限分位值；

K_c, K_s ——混凝土、钢筋的材料安全系数。

显然，极限状态设计方法具有很多优点（与前相比），在随机性处理采用了概论方法，但分项安全系数仍按经验确定，对结构可靠性也没有量的概念，故上述方法又称为半概率、半经验的极限状态设计方法，或第一水准的极限状态设计方法。**85**年版《公路桥规》采用该设计方法。

4. 近似概率的极限状态设计方法

1) 极限状态方程、可靠概率、失效概率

若以 S 表示荷载效应， R 表示结构的抗力，由前述 S 、 R 均为随机变量，若令 $Z=R-S$ 为结构功能函数，则有

$Z < 0$ 表示结构失效

$Z > 0$ 表示结构可靠

$Z = 0$ 表示结构处于极限状态

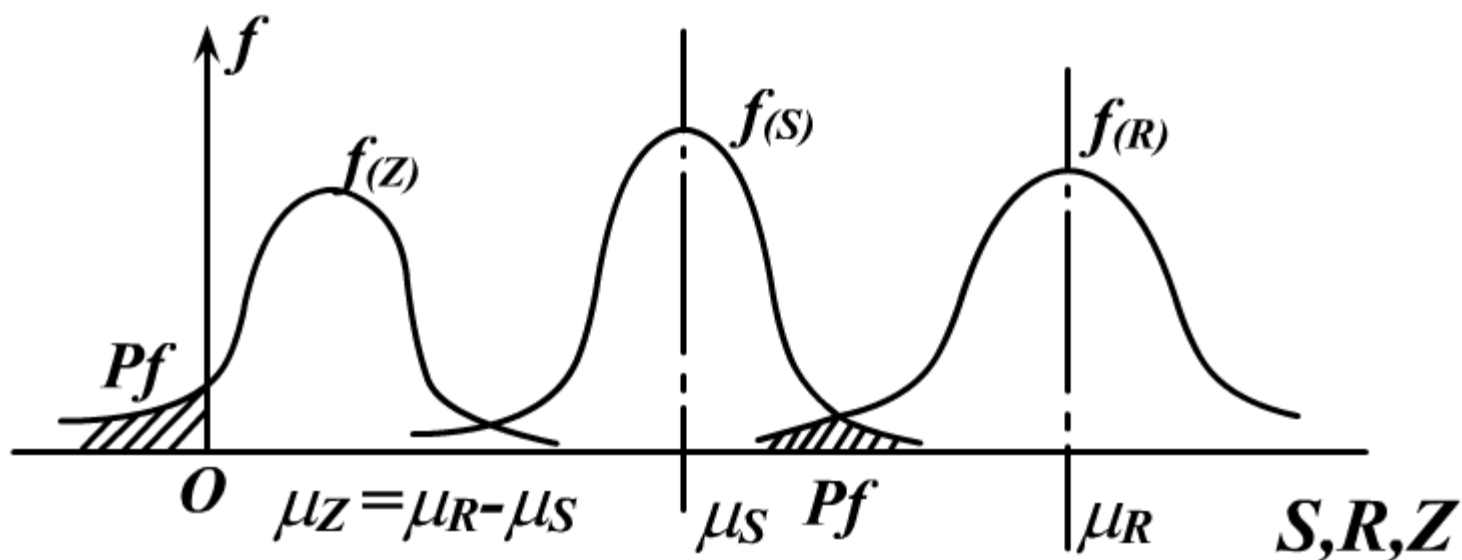
$Z = R - S = 0$ 称为极限状态方程

因 R 、 S 是随机变量，故 Z 为随机变量

结构失效概率 $P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f(z) dz$

结构可靠概率 $P_s = P(Z > 0) = 1 - P(Z < 0) = 1 - P_f$

式中 $f(z)$ 为 R 、 S 联合分布概率密度函数



2) 可靠指标

若R、S为正态分布，则Z也为正态分布，且有

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_S \quad \sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$$

$$f(z) = \frac{1}{\sigma_Z \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\mu_Z)^2}{2\sigma_Z^2}}$$

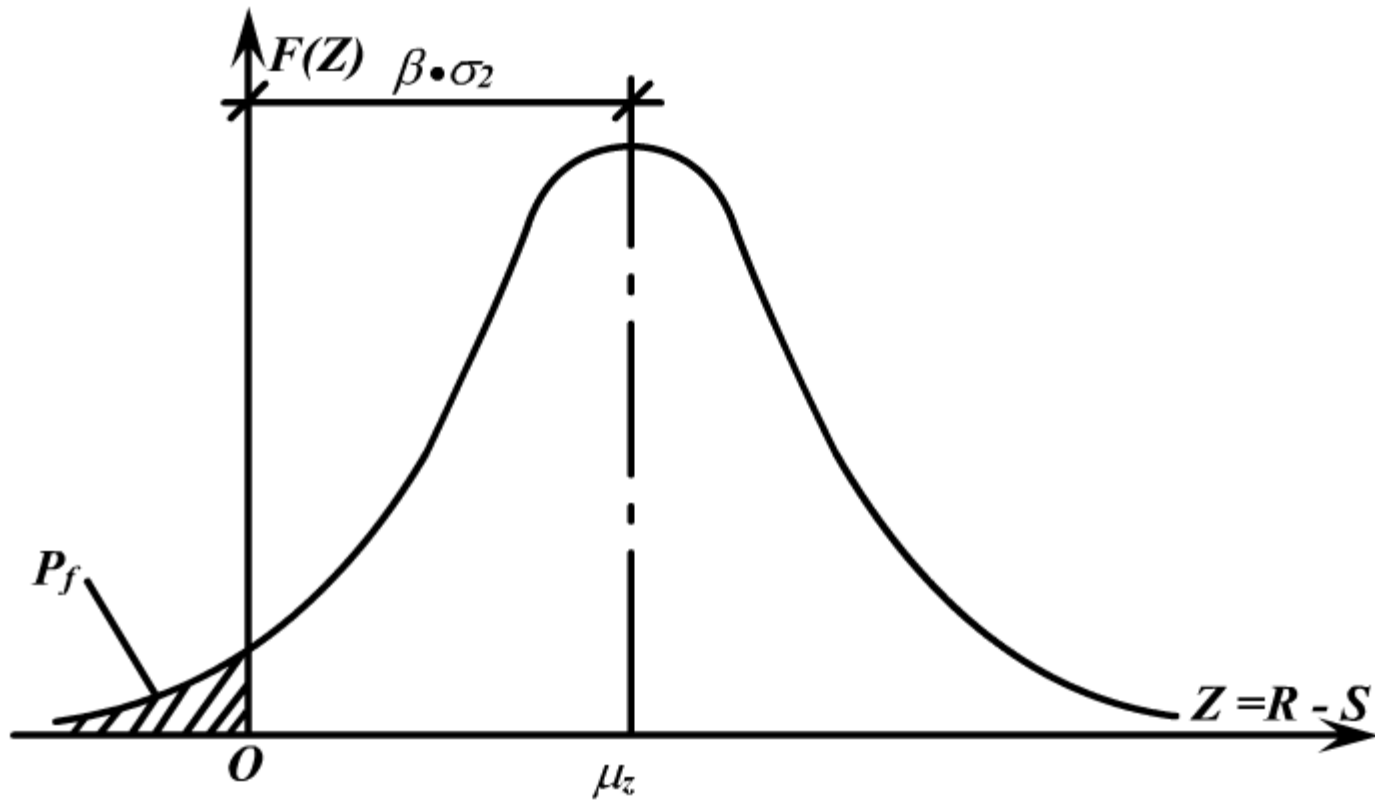
$$P_f = P(Z < 0) = P\left(\frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z} < \frac{-\mu_Z}{\sigma_Z}\right)$$

令 $\frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \beta$ ，则

$$P_f = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta)$$

$$\therefore P_S = \Phi(\beta)$$

β 愈大, P_s 愈大, 故 β 称为结构可靠性指标, β 值取决于 μ_z 和 σ_z 两方面的变化, β 与 P_f 对应值见下页表。



可靠指标与失效概率之间的对应关系

$[\beta]$	P_f	$[\beta]$	P_f	$[\beta]$	P_f
1.0	1.59×10^{-1}	2.7	3.47×10^{-3}	3.7	1.08×10^{-4}
1.5	6.68×10^{-2}	3.0	1.35×10^{-3}	4.0	3.17×10^{-5}
2.0	2.28×10^{-2}	3.2	6.87×10^{-4}	4.2	1.33×10^{-5}
2.5	6.21×10^{-3}	3.5	2.33×10^{-4}	4.5	3.40×10^{-6}

3) 结构安全等级和目标可靠度指标 $[\beta]$

i. 安全等级

根据结构的重要性，以及破坏后引起后果不同，应该将结构分为不同的安全等级，具有不同的可靠度。

安全等级	破坏后果的影响程度	建筑物的类型
一级	很严重	重要的建筑物
二级	严重	一般的建筑物
三级	不严重	次要的建筑物

一般柱梁构件的安全等级等于结构的安全等级

ii. 目标可靠度指标 $[\beta]$

$[\beta]$ 就是要解决安全和经济之间的合理均衡问题，它的确定相当困难，目前《混凝土规范》采用"校正法"确定 $[\beta]$ ，即承认并继承原规范的可靠水平为设计的前提，按此方法，设计表达式为：

$$\beta \geq [\beta]$$

由于脆性破坏比延性破坏更为突然，故其相应 $[\beta]$ 值也应较高，计算得到延性破坏（II级结构）为3.2，脆性破坏为3.7，再考虑结构重要性影响，定出的 $[\beta]$ 值见表。

破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	3.7	3.2	2.7
脆性破坏	4.2	3.7	3.2

对于正常使用极限状态， $[\beta]$ 为1~2

5. 荷载和材料强度的取值

1) 荷载取值

(1) 统计特征

- i. 永久荷载的概率分布大多数服从正态分布
- ii. 可变荷载的概率分布基本上服从极值I型分布

(2) 荷载的代表值 Q_K

分为标准值，准永久值和组合值三种，旨在满足不同要求

i. 荷载标准值

是最基本的代表值，其它代表值可由标准值乘以系数得到，荷载标准值在理论上应取50年设计基准期内，具有一定期保证率的上限分位值，但目前取值还继承历史，采用议定取值和传统习惯而定。

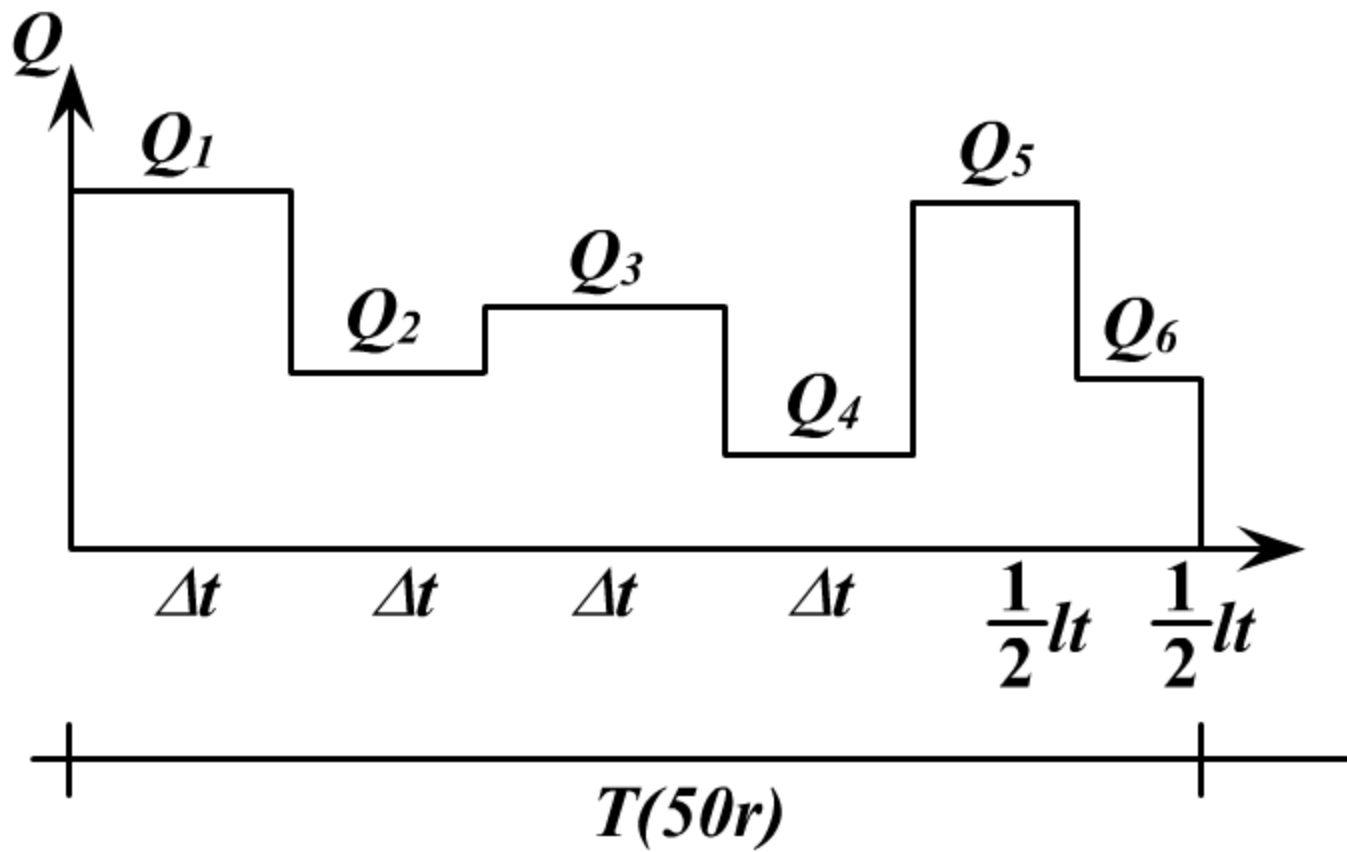
ii. 准永久值

对可变荷载标准值进行一定的折减，记为 $\psi_{\theta} \theta_K$, ψ_{θ} 为准永久系数。

iii. 可变荷载的频遇值——根据可变荷载超越的总时间或超越次数确定，频遇值等于标准值乘以频遇值系数得到。

iv. 组合值

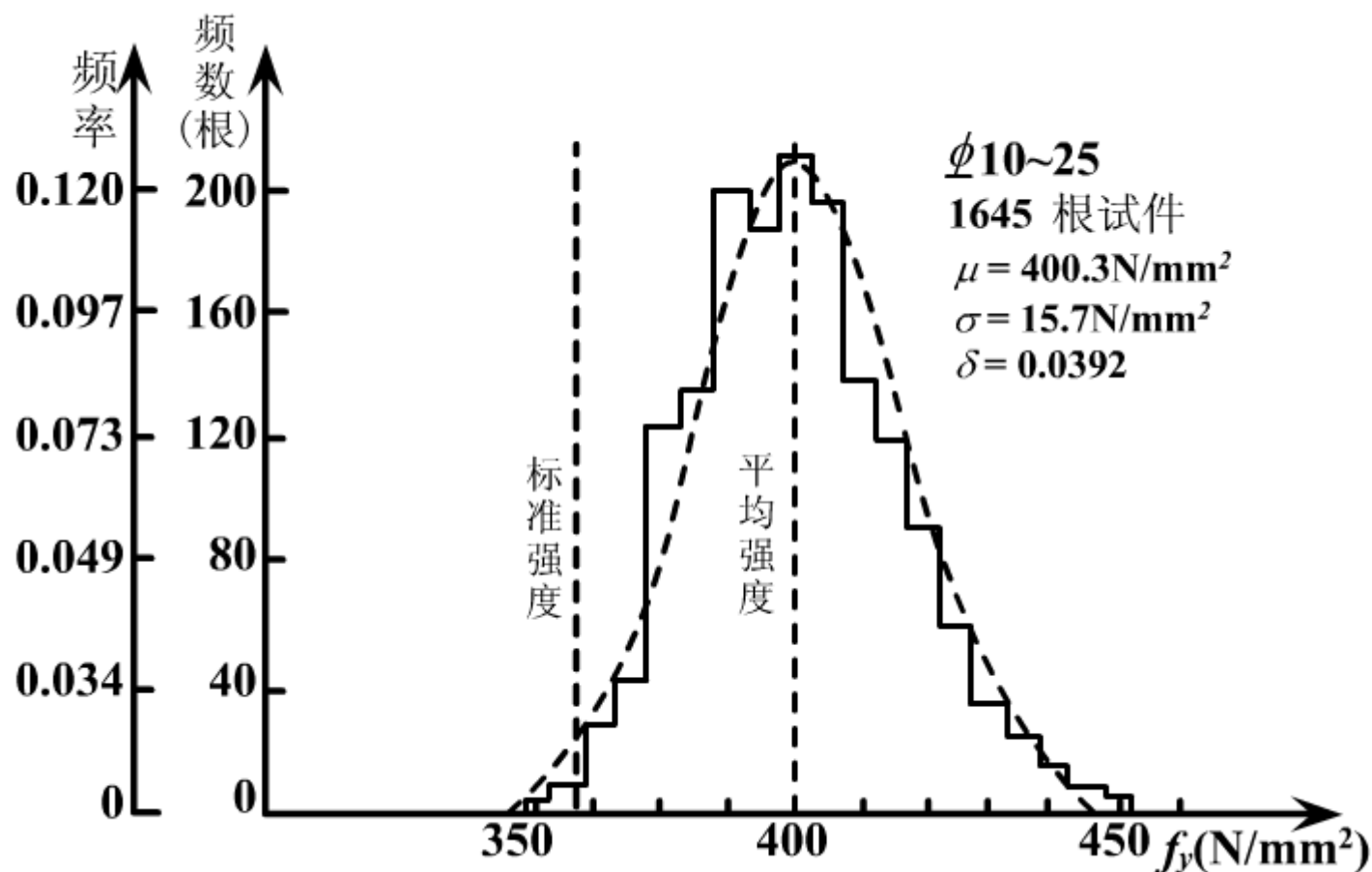
对可变荷载进行折减，记为 $\psi_c \theta_K$, ψ_c 为组合系数。



2) 材料强度取值

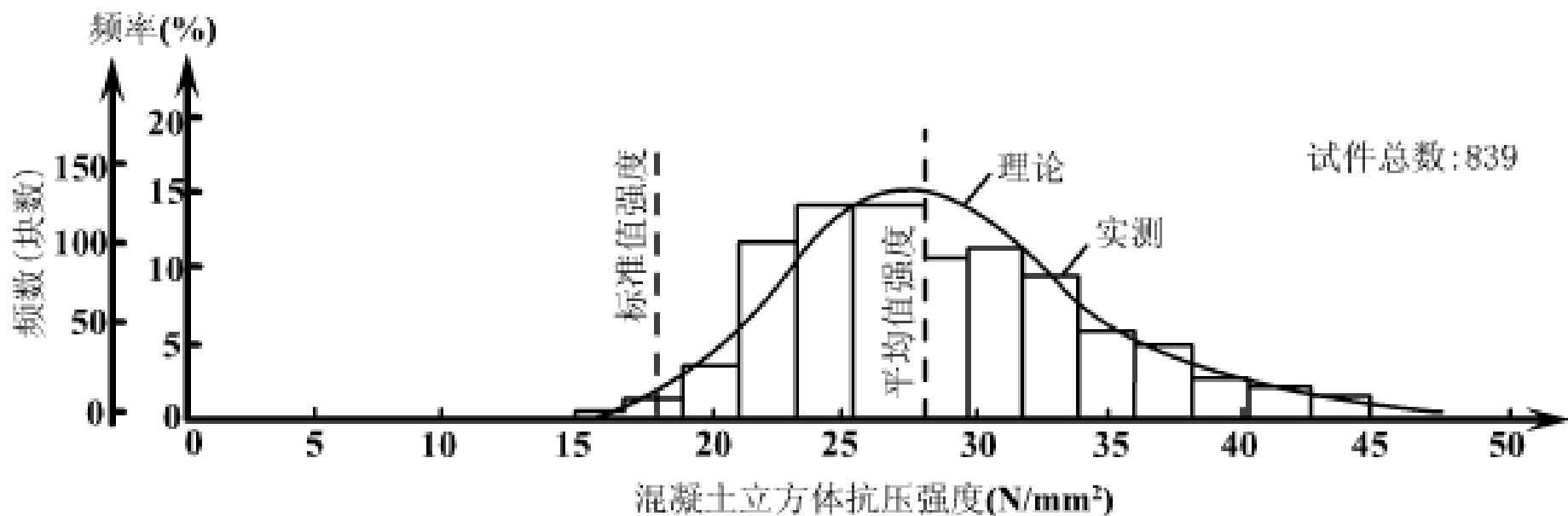
(1) 钢筋标准强度

取钢筋的废品限值，即为按 2σ 原则确定的，具有97.7%保证率的下限分位值 $(\mu - 2\sigma)$ 。



(2) 混凝土的标准强度，强度等级

按 1.645σ 原则确定，即为具有95%保证率的下限分位值 ($\mu - 1.645\sigma$)



6. 实用设计表达式

1) 分项系数

按可靠指标设计即要求

$$\beta \geq [\beta]$$

上式不利于工程实用，故需转为传统的分项系数表达式，此处分项系数的选取使下式与上式等价：

$$S^* \leq R^*$$

S^*, R^* 都是用分项系数表示的确定值，或表达为

$$\gamma_s S_k \leq \frac{R_k}{\gamma_k}$$

γ_s, γ_k 为分项系数

若令 γ_S, S_K 为荷载效应的设计值, $\frac{R_K}{\gamma_R}$ 为抗力的设计值, 并考虑结构安全等

级对可靠性影响, 则可得到一般意义的实用设计表达式为 $\gamma_0 \cdot S \leq R$

R ——抗力设计值

S ——荷载效应设计值

γ_0 ——结构重要性系数

{	安全等级I级或使用期限 $\geq 100y$, 取 ≥ 1.1
	安全等级II级或使用期限 $\geq 50y$, 取 ≥ 1.0
	安全等级III级或使用期限 $\leq 5y$, 取 ≥ 0.9

对于正常使用极限状态, 仍有 $S^* \leq R^*$

但此时 γ_R, γ_S 为1, 即 (重要性系数也可不考虑)

$$S_K \leq R_K$$

2) 承载力极限状态设计表达式

(1) 作用组合

考虑基本组合，必要时尚应考虑偶然组合

在基本组合设计时，其组合设计值应从可变荷载效应控制的组合和由永久荷载效应控制的两组组合中最不利值确定。

(2) 表达式

$$S^* \leq R^*$$

$$R^* = R\left(\frac{f_{SK}}{\gamma_S}, \frac{f_{CK}}{\gamma_C}, \alpha_K, \dots\right) = R(f_S, f_C, \alpha_K, \dots)$$

由可变荷载效应控制的组合 $S^* = \gamma_0 \left(\gamma_G C_G G_K + \gamma_{Q1} Q_{1K} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{Ci} Q_{iK} \right)$

由永久荷载效应控制的组合 $S^* = \gamma_0 \left(\gamma_G C_G G_K + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{Ci} Q_{iK} \right)$

式中： G_K --永久荷载标准值

Q_{1K} ——最大的一个可变荷载的标准值

Q_{iK} ——其余可变荷载的标准值

γ_G ——永久荷载的分项系数，当永久荷载效应对结构不利时，对由可变荷载效应控制的组合一般取**1.2**；对由永久荷载效应控制的组合一般取**1.35**；当永久荷载效应对结构有利时，取**1.0**。

γ_{Q1}, γ_{Qi} ——可变荷载的分项系数，取**1.4**

C_G, C_{Q1}, C_{Qi} ——荷载效应系数

ψ_{Qi} ——可变荷载组合值系数

R ——抗力函数

f_{sk}, f_{ck} ——钢筋、混凝土的标准强度

f_s, f_c ——钢筋、混凝土的设计强度

γ_s, γ_c ——钢筋、混凝土的材料分项系数

α_K ——几何尺寸标准值

3) 正常使用极限状态的设计表达式

按不同的设计目的，可分别选用荷载的标准组合、频遇组合和准永久组合；

标准组合主要用于当一个极限状态被超越时将产生严重的永久性损害的情况；

频遇组合主要用于当一个极限状态被超越时将产生局部损害、较大变形或短暂振动的情况；

准永久组合主要用于荷载长期效应起决定影响时的情况。

标准组合时设计值 S^*

$$S^* = S_K = C_G G_K + C_{Q1} Q_{1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{Ci} C_{Qi} Q_{iK}$$

频遇组合时

$$S^* = C_G G_K + \psi_{q1} C_{Q1} Q_{1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{qi} C_{Qi} Q_{iK}$$

准永久组合时

$$S^* = C_G G_K + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} C_{Qi} Q_{iK}$$

式中： ψ_{Ci} ——组合值系数

ψ_{q1} ——频遇值系数

ψ_{qi} ——准永久值系数

设计表达式 $S^* \leq R^*$

R^* --为规范规定的挠度，裂缝宽度等限制值

4) 材料的设计强度

在承载能力极限状态设计表达式中出现的是混凝土、钢筋的设计强度，即隐含了分项系数 γ_s, γ_c

$$f_s = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \quad f_c = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

经分析 γ_s 一般在**1.1~1.15**， $\gamma_c = 1.4$ ，故可得到混凝土设计强度、钢筋设计强度如下表所示

项次	种类	γ_s
1	HPB235(Q235)	≈ 1.15
2	HRB335,HRB400,RRB400	≈ 1.1
3	消除应力钢丝，刻痕钢丝，钢绞线， 热处理钢筋	≈ 1.2

混凝土强度标准值(N/mm²)

附表2-1

强度种类	符号	混凝土强度等级						
		C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45
轴心抗压	f_{ck}	10.0	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6
轴心抗拉	f_{tk}	1.27	1.54	1.78	2.01	2.20	2.40	2.51
强度种类	符号	混凝土强度等级						
		C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
轴心抗压	f_{ck}	32.4	35.5	38.5	41.5	44.5	47.4	50.2
轴心抗拉	f_{tk}	2.65	2.74	2.85	2.93	3.00	3.05	3.10

混凝土强度设计值 (N/mm²)

附表2-2

强度种类	符号	混凝土强度等级						
		C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45
轴心抗压	f_c	7.0	9.6	11.9	14.3	16.7	19.1	21.2
轴心抗拉	f_t	0.91	1.10	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80
强度种类	符号	混凝土强度等级						
		C50	C55	C60	C65	C70	C75	C80
轴心抗压	f_c	23.1	25.3	27.5	29.7	31.8	33.8	35.9
轴心抗拉	f_t	1.89	1.96	2.04	2.09	2.14	2.18	2.22

普通钢筋强度标准值 (N/mm^2)

附表 2-6

种 类		符 号	d (mm)	f_{yk}
热轧钢筋	HPB 235 (Q235)	ϕ	8~20	235
	HRB 335 (20MnSi)	\oplus	6~50	335
	HRB 400 (20MnSiV、20MnSiNb、20MnTi)	\oplus	6~50	400
	RRB 400 (20MnSi)	\oplus^R	8~40	400

普通钢筋强度设计值 (N/mm^2)

附表 2-7

种 类		符 号	f_y	f_y
热轧钢筋	HPB 235 (Q235)	ϕ	210	210
	HRB 335 (20MnSi)	\oplus	300	300
	HRB 400 (20MnSiV、20MnSiNb、20MnTi)	\oplus	360	360
	RRB 400 (20MnSi)	\oplus^R	360	360

注：1. 在钢筋混凝土结构中，轴心受拉和小偏心受拉的钢筋抗拉强度设计值大于 $300\text{N}/\text{mm}^2$ 时，仍应按 $300\text{N}/\text{mm}^2$ 取用；

2. 构件中配有不同种类的钢筋时，每种钢筋采用各自的强度设计值。

5) 设计表达式举例

图示为一钢筋混凝土轴拉杆，已知该构件安全等级II级， P_1 为永久荷载， P_2 为可变荷载，钢筋设计强度为 f_s ，求承载力极限状态的设计表达式。



解： $\gamma_0 = 1$, $\gamma_Q = 1.4$, $\gamma_G = 1.2$

以拉力表示：
$$1 \times (1.2 \times 1 \times P_1 + 1.4 \times 1 \times P_2) \leq f_s A_s$$

以应力表示：
$$1 \times \left(1.2 \times \frac{1}{A_s} P_1 + 1.4 \times \frac{1}{A_s} P_2 \right) \leq f_s$$

1.4 本课程的特点及学习方法建议

- 交通工程与信息技术专业的混凝土结构设计原理这门课程，按教学大纲主要要求同学们通过这门课的学习，熟练掌握混凝土结构基本构件的设计方法，对混凝土桥梁能进行结构设计，所以，对于本教科书内容可分为两大部分。
- 第一部分为基本概念、基本构件的受力性能分析。
- 第二部分为按规范的具体设计方法。

- 工业与民用建筑专业与交通工程专业在第一部分内容要求是相同的，在第二部分则明显不同，前者采用《混凝土结构设计规范》（**GB50010**），后者采用《公路钢筋混凝土及预应力桥涵设计规范》（**JTJ023-85**），以后分别简称为《混凝土设计规范》和《公路桥规》

UDC

中华人民共和国国家标准

P



GB 50010—2002

混凝土结构设计规范

Code for design of concrete structures

2002—02—20 发布

2002—04—01 实施

中华人民共和国建设部 联合发布
国家质量监督检验检疫总局

中华人民共和国交通部部标准

公路钢筋混凝土及预应力混凝土
桥涵设计规范

JTJ 023—85

1985 北京

规范的意义和用途.

学习建议

本课程学习是一门专业课的学习，有其特点：

1) 涉及材力、高数、结力、建筑学、建筑施工方面多种知识。

——基础知识扎实，要会分析归纳，善于抓主要矛盾。

2) 实践性

——除计算外，还需要学构造要求，配筋技巧，以及实用估算。

3) 尽快“入门”

——对于简支梁正截面计算是一个“入门”，如果能尽快“入门”，也就是对钢筋混凝土结构基本分析和计算的初步认识，跨过此“门槛”后，以后章节就相对容易。

钢筋混凝土结构课的性质及其学习方法：

专业基础课

专业：要耗费人大量精力的一门非常广阔的学问。

混凝土结构学科的特点：

综合性

实验研究的重要性。

4) 既要遵守规范，又要能动分析。

——规范是我们行业的国家标准和法规，必须认真执行，因此对规范有关计算规定和方法的背景以及适用范围都应熟悉，并熟练掌握、应用。但对于规范尚未考虑的问题也应能认真、科学分析，发挥自己的能动性。