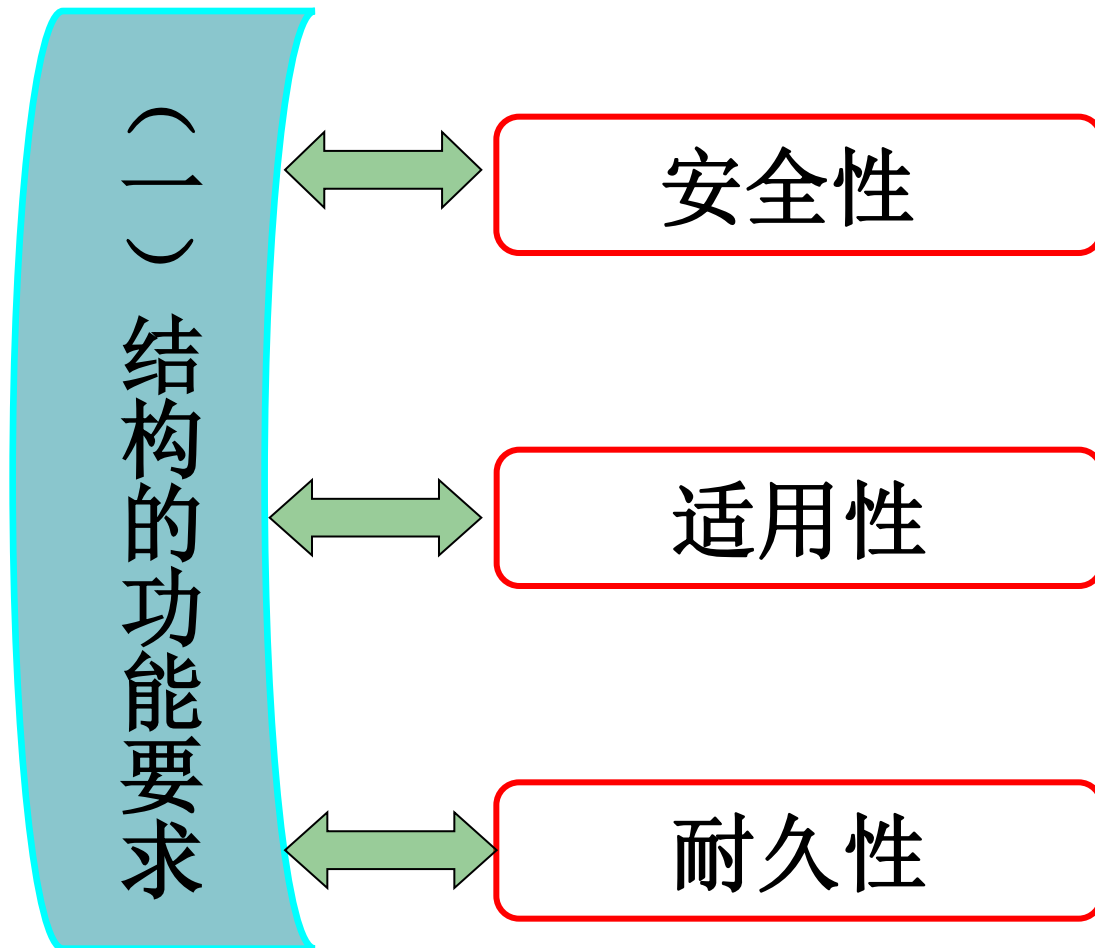


钢筋混凝土结构设计原理

一、结构的功能要求与极限状态



(1) 安全性。要求结构在正常施工和正常使用时，能承受可能出现的各种作用而不发生破坏，并且在设计规定的偶然事件发生时及发生后，仍能保持必需的整体稳定性。

(2) 适用性。要求结构在正常使用时能满足正常的使用要求，具有良好的工作性能，不发生影响正常使用的过大变形和振幅，不产生过宽的裂缝。

(3) 耐久性。在正常使用和正常维护条件下，结构在规定的使用期限内满足安全和使用功能要求，不出现钢筋严重锈蚀和混凝土严重碳化。

安全性、适用性、耐久性统称为结构的可靠性。

结构的可靠性与结构的经济性是相互矛盾的。



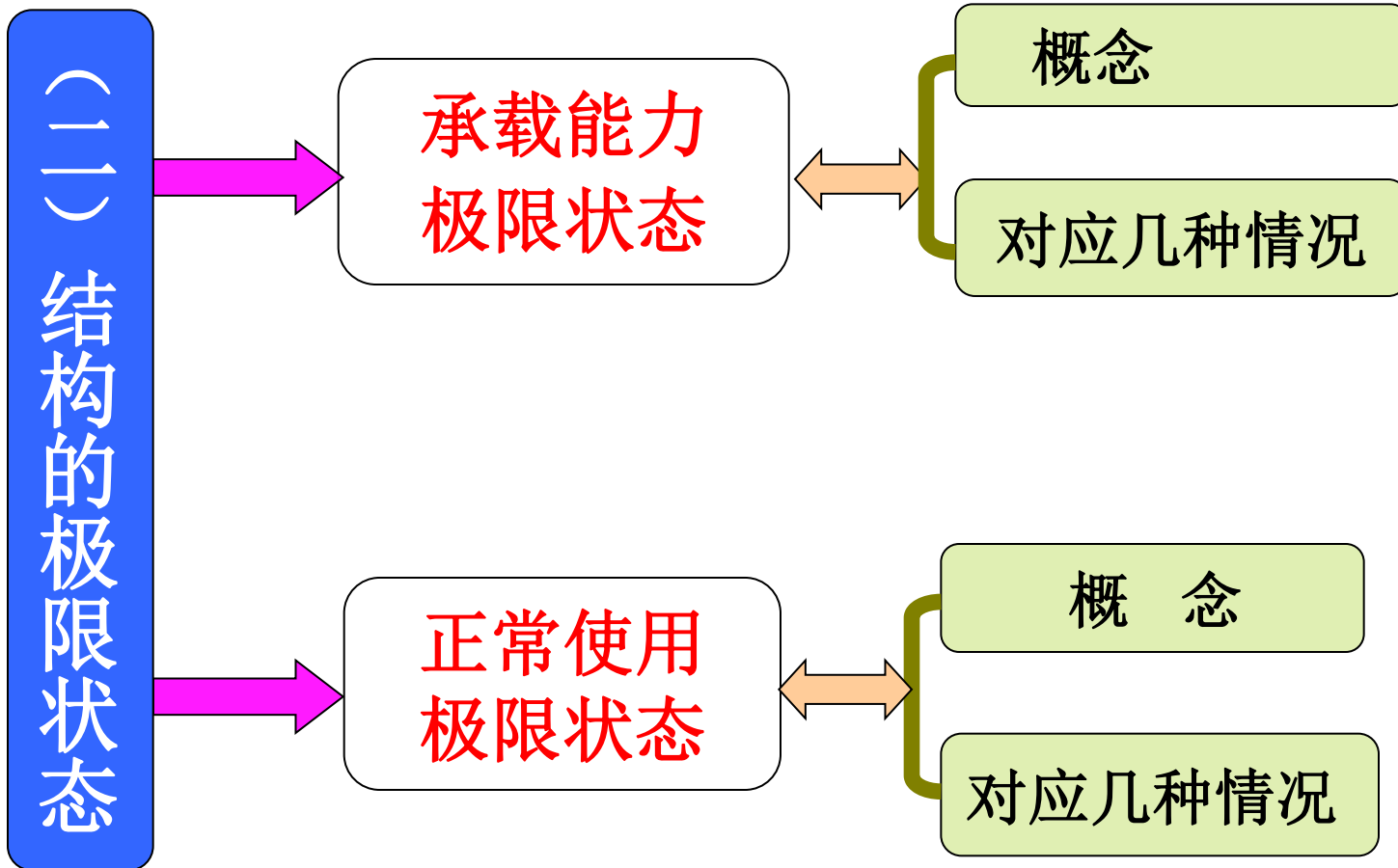
石漫滩水库溃坝事件

1975年8月，河南省驻马店地区的板桥、石漫滩两座大型水库，相继垮坝溃决

1100万人受灾，
伤亡惨重，直接经
济损失近百亿元

按设计规范、标准
进行设计，遵守设
计人员职业道德

没有遵守职业道德，造
成事故，后果非常严重



承载能力极限状态

结构或结构的一部分超过**某一特定状态**就不能满足设计规定的某一功能要求，此特定状态称为该功能的极限状态。

结构的极限状态可分为**承载能力极限状态**和**正常使用极限状态**。



赵国藩（1924.12.29-2017.2.1），出生于山西汾阳，土木建筑结构工程学家。赵国藩长期从事结构可靠性及钢筋混凝土结构理论和工程应用研究，为制定中国水利水电、港工、建筑、桥梁等专业的工程结构规范，作出了重要贡献。

赵国藩早在**20世纪50年代**就在中国国内系统介绍了**极限状态设计理论**，**60年代**在中国国内首次提出用一次二阶矩法计算安全系数。为中国工程结构可靠度设计统一标准的编制做了大量基础性工作。

热爱祖国、热爱科学
严谨的工作态度以及**高尚**的道德风范。

承载能力极限状态对应的几种情况

结构或构件达到最大承载能力，或达到不适于继续承载的变形的极限状态，称**承载能力极限状态**。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：

- (1) 整个结构或结构的一部分**失去刚体平衡**，如挡土墙的滑移、倾覆等；
- (2) 结构构件或连接**因超过材料强度而破坏**（包括疲劳破坏），或因过度变形而不适于继续承载；
- (3) 结构或结构构件**丧失稳定**，如柱压曲等；
- (4) 整个结构或结构的一部分**转变为机动体系**。

- (1) 承载能力极限状态是判别结构或构件是否满足安全性功能要求的标准，因此，所有结构和构件必须按承载能力极限状态进行计算，并保证有足够的可靠度；
- (2) 必要时尚应进行结构的抗倾、抗滑及抗浮验算；
- (3) 对需要抗震设防的结构，尚应进行结构的抗震承载能力计算。

正常使用极限状态

结构或构件达到使用功能上允许的某一规定限值的极限状态，称**正常使用极限状态**。当结构或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) 影响结构正常使用或外观的**变形**；
- (2) 对运行人员、设备、仪表等有不良影响的**振动**；
- (3) 对结构外形、耐久性以及防渗结构抗渗能力有不良影响的**局部损坏（如裂缝等）**；
- (4) 影响正常使用的**其他特定状态**。

对使用上需控制变形值的结构构件，应进行**变形验算**；

对使用上要求不允许开裂或控制裂缝开展宽度的结构构件，应进行**抗裂或裂缝宽度**验算。

结构设计通常**先**按承载能力极限状态设计结构构件，**然后**按正常使用极限状态进行验算。

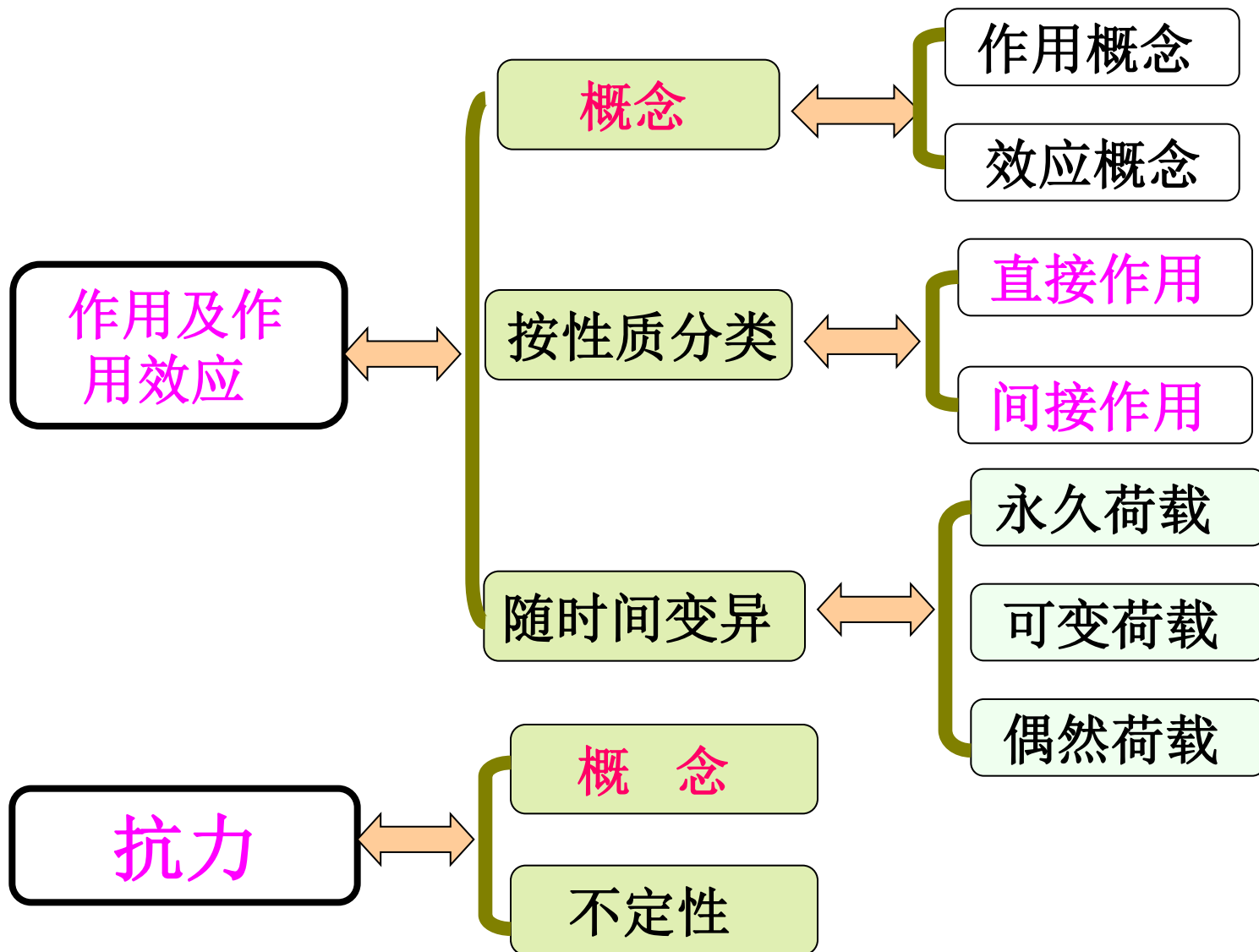




9E
E



二、作用与抗力



（一）作用及作用效应

结构的**作用**是指能使结构产生**内力、变形、位移、裂缝**等各种原因的总称。根据其性质不同，作用可分为以下两类：

（1）**直接作用**。施加在结构上的集中力或分布力。如结构自重、风荷载、水压力、土压力等。

（2）**间接作用**。引起结构约束变形、外加变形的原因。如混凝土收缩、环境温度变化以及由于基础不均匀沉陷等原因使结构产生的变形。

作用引起的结构或构件的**反应**，例如内力、变形和裂缝等，称为**作用效应**，用符号 **S** 表示。

习惯将**直接作用和间接作用不加区分**，统称为“**荷载**”。



荷载按**随时间的变异性**和**出现的可能性**分为以下三类：

(1) **永久荷载**。在设计使用年限内量值不随时间变化，或其变化与平均值相比可忽略不计的荷载，如**结构自重**、土压力、固定设备自重、预应力等。

(2) **可变荷载**。在设计使用年限内量值随时间变化，且其变化与平均值相比不可忽略不计的荷载，如**楼面活荷载**、风荷载等。

(3) **偶然荷载**。在设计使用年限内出现的概率很小，而一旦出现，其量值很大，且持续时间很短的荷载，如校核洪水位时的静水压力、**罕遇地震**产生的冲击力等。

（二）抗力

（1）结构构件抵抗荷载效应的能力称**抗力**，用符号 **R** 表示。抗力由**材料的强度**及**截面尺寸**等因素计算得出。

（2）由于构件制作尺寸偏差和安装误差等原因，导致结构构件实际尺寸与设计规定的**尺寸**有**差异**。

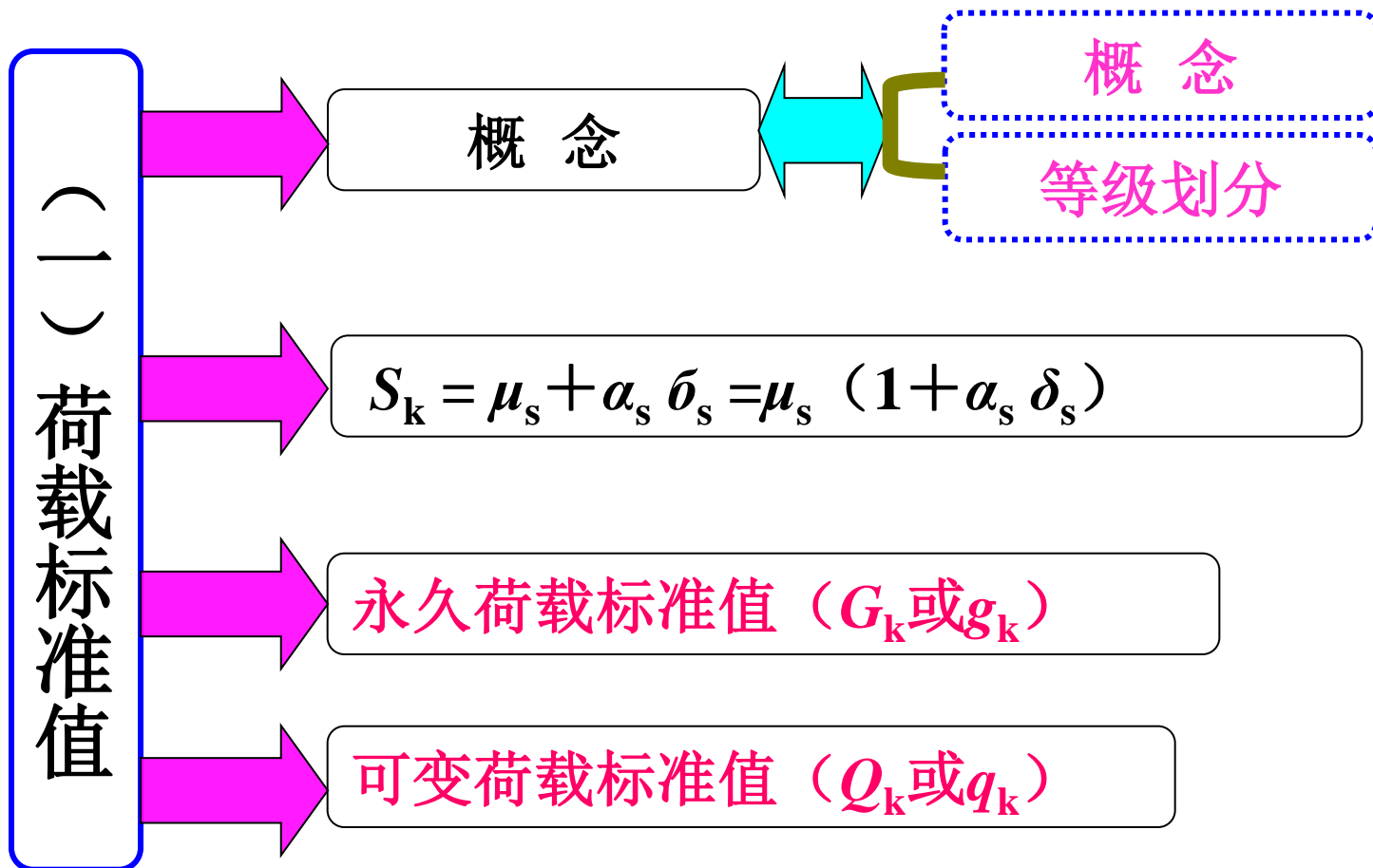
由于材料非匀质、生产工艺等因素导致材料强度的**变异性**。另外，对结构构件的抗力进行分析计算时，采用了近似的基本假设和**计算公式不精确**，导致按公式计算的抗力值与实际结构构件的抗力有差异。由此可知，**结构的抗力具有不定性**。



罕遇地震荷载取值首先要考虑**结构的安全**，其次要考虑**节能**。若偶然荷载取得过大，会造成很大的浪费。

“安全第一”是做好一切工作的试金石，是落实“以人为本”的根本措施。坚持安全第一，就是对国家负责，对企业负责，对人的生命负责。

三、荷载与材料强度取值



(一) 荷载标准值

荷载标准值是指结构或构件设计时，采用的各种荷载的基本代表值。按设计使用年限内荷载最大值的概率分布的某一位位值确定。

由于荷载本身具有随机性，因而最大荷载也是随机变量，用荷载的概率分布来描述。荷载的概率分布曲线如下页图所示，荷载的标准值为：

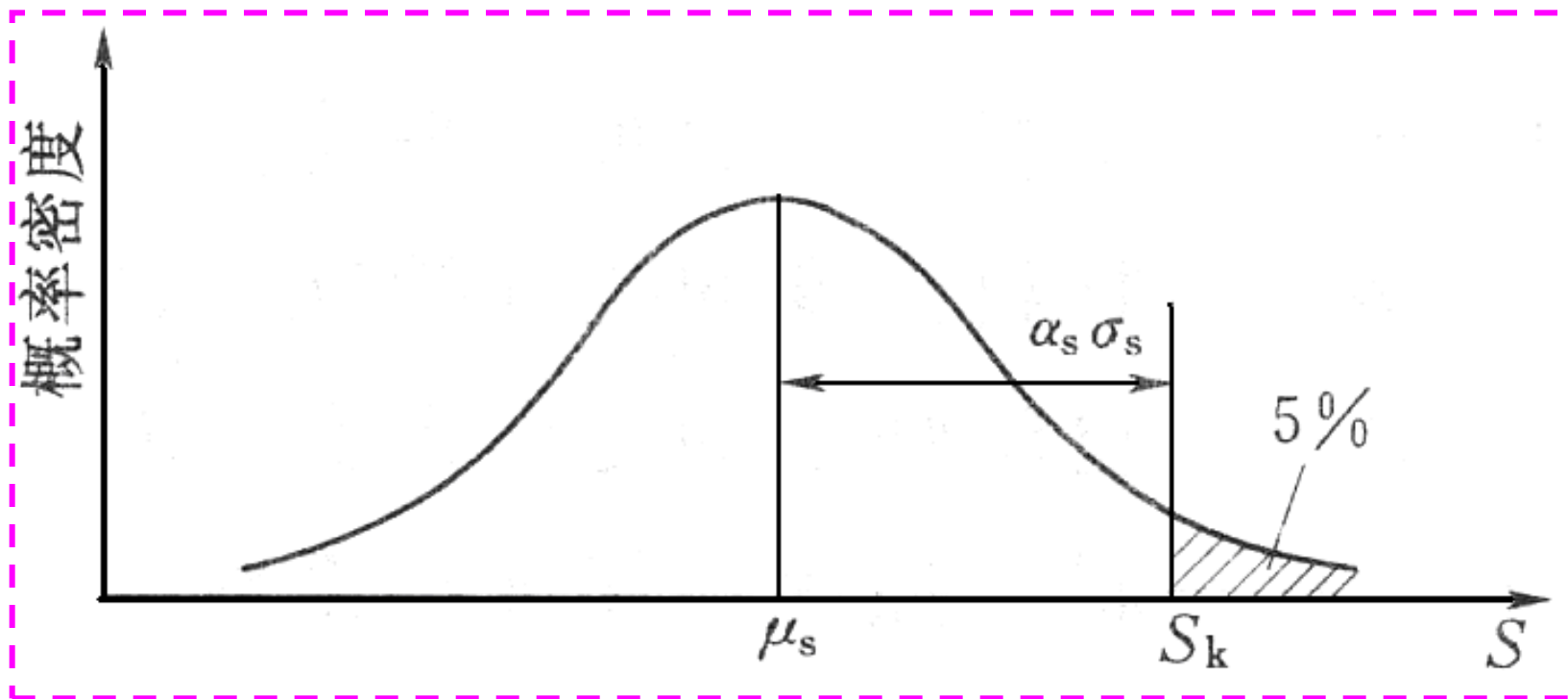
$$S_k = \mu_s + \alpha_s \sigma_s = \mu_s (1 + \alpha_s \delta_s)$$

式中 μ_s ——荷载的统计平均值；

σ_s ——荷载的统计标准差；

δ_s ——荷载的变异系数， $\delta_s = \sigma_s / \mu_s$

α_s ——荷载标准值的保证率系数。



荷载的概率分布曲线

(1) 永久荷载标准值 (G_k 或 g_k)：可按结构构件的设计尺寸与材料重度标准值计算。

(2) 可变荷载标准值 (Q_k 或 q_k)：根据设计使用年限内最大荷载概率分布的某一分位值确定。

当 $\alpha_s=1.645$ 时，荷载标准值相当于具有95%保证率的0.95分位值。作用在结构构件上的实际荷载超过荷载标准值的可能性只有5%。此标准值为荷载的代表值。

水工建筑物的荷载标准值可根据《水工建筑物荷载设计规范》(DL5077-2016)确定。例如水电站副厂房楼面均布活荷载标准值见表1-4。

表1-4 水电站副厂房楼面均布活荷载标准值 (kN/m²)

	房间名称	标准值		房间名称	标准值
生产用副厂房	中央控制室 计算机室	5~6	生活用副厂房	值班室	3
	继电保护室	5		会议室	4
	蓄电池室	6		资料室	5
	开关室	5		厕所、盥洗室	3
	电缆室	4		走道、楼梯	4
	空压机室	4			
	水泵室	4			
	试验室	4			
	电工室	5			
	机修室	7~10			
工具室	5				

(二) 材料强度

材料强度
标准值

概念

$$f_k = \mu_f - \alpha_f \sigma_f \\ = \mu_f (1 - \alpha_f \delta_f)$$

材料强度
设计值

概念

$$f_c = f_{ck} / \gamma_c \\ f_y = f_{yk} / \gamma_s$$

1.材料强度标准值

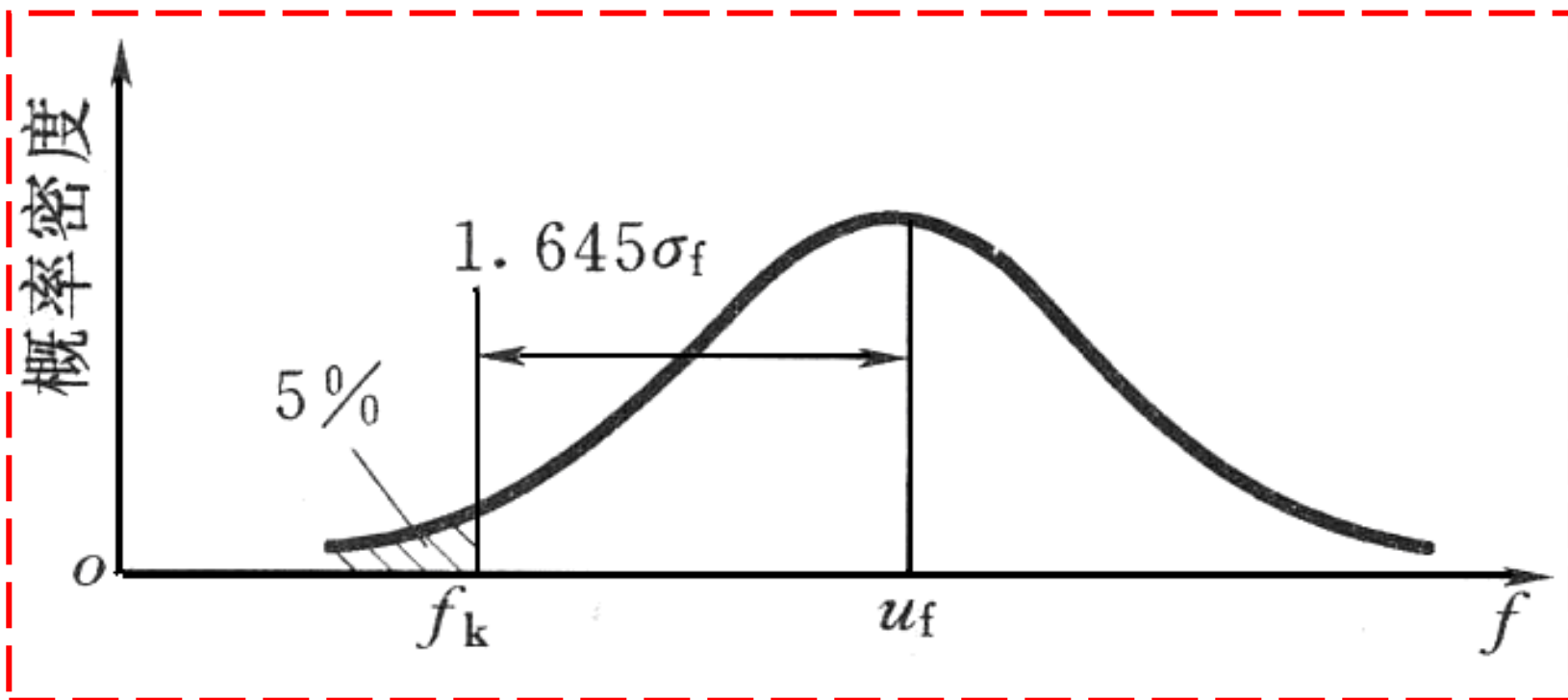
材料强度标准值是指结构或构件设计时，采用的材料强度的**基本代表值**。按符合规定质量的材料强度的概率分布的某一分位值确定。

由于材料非匀质、生产工艺等因素导致材料强度的变异性，材料强度也是**随机变量**。

当材料强度服从正态分布时，材料标准值可按下式计算：

$$f_k = \mu_f - \alpha_f \sigma_f = \mu_f (1 - \alpha_f \delta_f)$$

钢筋和混凝土的强度标准值采用概率分布的**0.05分位值**。钢筋和混凝土实际强度小于强度标准值的可能性只有**5%**，即强度标准值具有**95%**的保证率。



材料强度标准值的取值

附表1-1

混凝土强度标准值 (N/mm²)

强度种类	符号	混凝土强度等级									
		C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
轴心受压	f_{ck}	10.0	13.4	16.7	20.1	23.4	26.8	29.6	32.4	35.5	38.5
轴心受拉	f_{tk}	1.27	1.54	1.78	2.01	2.20	2.39	2.51	2.64	2.74	2.85

附表1-4

普通钢筋强度标准值 (N/mm²)

种类		符号	直径 (mm)	f_{yk}
热 轧 钢 筋	HPB235 (Q235)	Φ	8~20	235
	HRB335 (20MnSi)	Φ	6~50	335
	HRB400 (20MnSiV、20MnSiNb、 20MnTi)	Φ	6~50	400
	RRB400 (K20MnSi)	Φ ^R	8~40	400

2.材料强度设计值

材料强度设计值等于材料强度标准值除以相应的材料强度分项系数，即 $f_c=f_{ck}/\gamma_c$ 、 $f_y=f_{yk}/\gamma_s$ 。

混凝土的强度设计值见附表1-2， $\gamma_c=1.4$ 。

钢筋的强度设计值见附表1-5； $\gamma_s=1.1$ 、 1.2 。

预应力的强度设计值见附表1-7。

附表1-2

混凝土强度设计值 (N/mm²)

强度种类	符号	混凝土强度等级									
		C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60
轴心受压	f_c	7.2	9.6	11.9	14.3	16.7	19.1	21.1	23.1	25.3	27.5
轴心受拉	f_t	0.91	1.10	1.27	1.43	1.57	1.71	1.80	1.89	1.96	2.04

附表1-5

普通钢筋强度设计值 (N/mm²)

种类		符号	f_y	f_y'
热 轧 钢 筋	HPB235 (Q235)	Φ	210	210
	HRB335 (20MnSi)	Φ	300	300
	HRB400 (20MnSiV、20MnSiNb、 20MnTi)	Φ	360	360
	RRB400 (K20MnSi)	Φ ^R	360	360

四、结构的可靠度

(一) 可靠概率和失效概率

$$Z = R - S$$

$Z > 0$ 时

$Z < 0$ 时

$Z = 0$ 时

可靠概率 P_s

$$P_s = \int_0^{\infty} f(z) dz$$

失效概率 P_f

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f(z) dz$$

结构的可靠度是指结构在规定的时间内，规定的条件下，完成预定功能的概率。

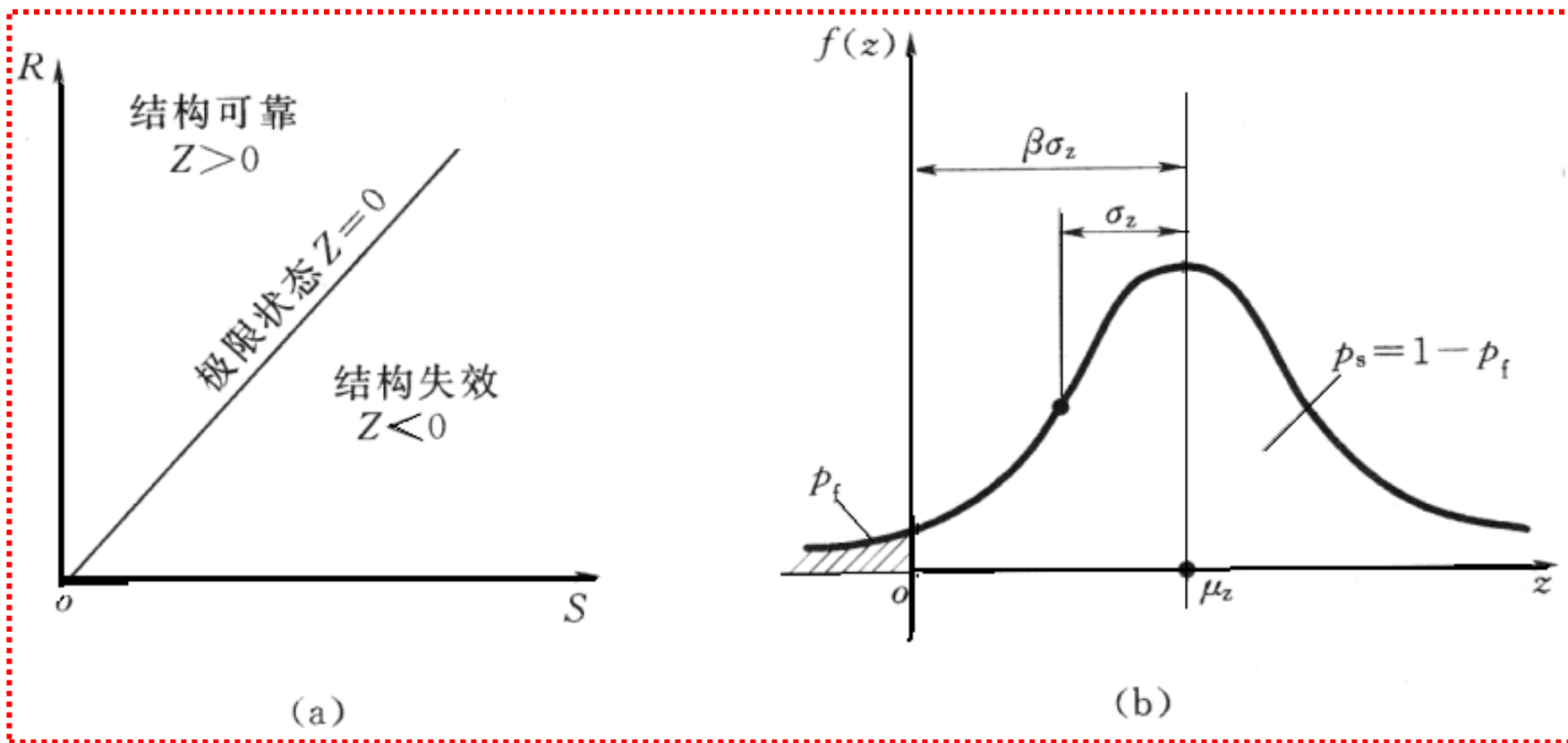
可靠度是对结构可靠性的定量描述，结构可靠度的评价指标有可靠概率、失效概率、可靠指标。

(一) 可靠概率和失效概率

影响结构可靠性的主要因素是荷载效应 S 和抗力 R 。荷载效应 S 和抗力 R 都是随机变量。假定 S 和 R 相互独立，且都服从正态分布，取： $Z = R - S$

功能函数的结果有三种可能：

- (1) $Z > 0$ 时，结构完成功能要求，处于可靠状态；
- (2) $Z < 0$ 时，结构没有完成功能要求，处于不可靠状态；
- (3) $Z = 0$ 时，结构达到功能要求的限值，处于极限状态。



功能函数 Z 及其概率分布曲线

μ_z 、 σ_z 分别表示结构的功能函数的平均值和标准差，则 $Z \geq 0$ 的概率为可靠概率 P_s ，即结构在规定的时间内，在规定条件下，完成预定功能的概率。

$$P_s = \int_0^{\infty} f(z) dz$$

$Z < 0$ 的概率为失效概率 P_f ， P_f 等于图中阴影部分的面积。

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f(z) dz$$

$$P_f + P_s = 1$$

失效概率 P_f 愈小，结构的可靠性愈高。

(二) 可靠指标

可靠指标 β 为结构功能函数 Z 的平均值 μ_Z 与标准差 σ_Z 的比值, 即 $\beta = \mu_Z / \sigma_Z$ 。

可靠指标 β 替代失效概率 P_f 来度量结构的可靠性

表1-5 可靠指标 β 与失效概率 P_f 之间的对应关系

β	2.7	3.2	3.7	4.2
P_f	3.5×10^{-3}	6.9×10^{-4}	1.1×10^{-4}	1.3×10^{-5}

表1-6 持久状况结构承载能力极限状态目标可靠指标 β_T ($\beta \geq \beta_T$)

破坏类型	水工建筑物级别		
	1	2、3	4、5
延性破坏	3.7	3.2	2.7
脆性破坏	4.2	3.7	3.2