

## 第 3 章 混凝土结构设计的基本原则

### 3.1 混凝土结构设计理论的发展

最早的钢筋混凝土结构设计理论是采用以弹性理论为基础的容许应力计算法。这种方法要求在规定的标准荷载作用下，按弹性理论计算的应力不大于规定的容许应力。容许应力系由材料强度除以安全系数求得，安全系数则根据经验和主观判断来确定。由于钢筋混凝土并不是一种弹性材料，而是有着明显的塑性性能，因此，这种以弹性理论为基础的计算方法不能如实地反映构件截面的应力状态。20 世纪 30 年代出现了考虑钢筋混凝土塑性性能的破坏阶段计算方法。这种方法以考虑了材料塑性性能的结构构件承载力为基础，要求按材料平均强度计算的承载力必须大于计算的最大荷载产生的内力。计算的最大荷载是由规定的标准荷载乘以单一的安全系数而得出的，安全系数仍是根据经验和主观判断来确定。在 20 世纪 50 年代提出了极限状态计算法。极限状态计算法是破坏阶段计算法的发展，它规定了结构的极限状态，并把单一安全系数改为三个分项系数，即荷载系数、材料系数和工作条件系数，故又称为“三系数法”。三系数法把不同的材料和不同的荷载用不同的系数区别开来，使不同的构件具有比较一致的可靠度，部分荷载系数和材料系数是根据统计资料用概率的方法确定的。我国 1966 年颁布的《钢筋混凝土结构设计规范》BJG 21—66 即采用这一方法，1974 年颁布的《钢筋混凝土结构设计规范》TJ10—74 亦是采用极限状态计算法，但在承载力计算中采用了半经验、半统计的单一安全系数。

在总结我国的试验研究、工程实践经验和学习国外科技成果的基础上，我国于 2001 年颁布的修订本《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068—2001 采用了以概率论为基础的极限状态设计法，使我国的建筑结构设计基本原则更趋合理。目前，国际上将概率方法按精确程度不同分为三个水准：半概率法、近似概率法、全概率法。

(1) 水准 I——半概率法。对影响结构可靠度的某些参数，如荷载值和材料强度值等，用数理统计进行分析，并与工程经验相结合，引入某些经验系数。该法对结构的可靠度还不能做出定量的估计。我国的《钢筋混凝土结构设计规范》(TJ10—74)基本上属于此法。

(2) 水准 II——近似概率法。将结构抗力和荷载效应作为随机变量，按给定的概率分布估算失效概率或可靠指标，在分析中采用平均值和标准差两个统计参数，

且对设计表达式进行线性化处理，也称为“一次二阶矩法”，它实质上是一种实用的近似概率算法。为了便于应用，在具体计算时采用分项系数表达的极限状态设计表达式，各分项系数根据可靠度分析确定。我国《混凝土结构设计规范》（GB 50010—2002）采用的就是近似概率法。

（3）水准Ⅱ——全概率法，是完全基于概率论的设计法。

## 3.2 极限状态

### 3.2.1 结构上的作用及结构抗力

结构上的作用是指能使结构产生内力、应力、位移、应变、裂缝等效应的各种原因的总称，分直接作用和间接作用两种。荷载是直接作用，混凝土的收缩、温度变化、基础的差异沉降、地震等引起结构外加变形或约束的原因称为间接作用。间接作用不仅与外界因素有关，还与结构本身的特性有关。例如，地震对结构物的作用，不仅与地震加速度有关，还与结构自身的动力特性有关。

按作用时间的长短和性质，荷载可分为三类：

1)永久荷载 在结构设计使用期间，其值不随时间而变化，或其变化与平均值相比可以忽略不计，或其变化是单调的并能趋于限值的荷载。例如，结构的自重、土压力、预应力等，永久荷载又称为恒荷载。

2)可变荷载 在结构设计使用期内其值随时间而变化，其变化与平均值相比不可忽略的荷载。例如，楼面活荷载、屋面活荷载和积灰荷载、吊车荷载、风荷载、雪荷载等，可变荷载又称为活荷载。

3)偶然荷载 在结构设计使用期内不一定出现，一旦出现，其值很大且持续时间很短的荷载。例如，爆炸力、撞击力等。

《建筑结构荷载规范》（GBJ 50009—2001）规定，对不同荷载应采用不同的代表值。对永久荷载应采用标准值作为代表值。对可变荷载应根据设计要求采用标准值、组合值、频遇值或准永久值作为代表值。对偶然荷载应按建筑结构使用的特点确定其代表值。

作用效应是指作用引起的结构或结构构件的内力、变形和裂缝等，当为直接作用（即荷载）时，其效应也称为荷载效应，通常用  $S$  表示。结构抗力是指结构或结构构件承受作用效应的能力，如结构构件的承载力、刚度和抗裂度等，用  $R$  表示。它主要与结构构件的材料性能（强度、变形模量）、几何参数（构件尺寸等）和计算模式的精确性（抗力计算所采用的基本假设和计算公式不够精确）等有关。

结构的极限状态可以用极限状态函数来表达。承载能力极限状态函数可表示为

$$Z = R - S \quad (3-1)$$

根据概率统计理论，设 $S$ 、 $R$ 都是随机变量，则 $Z = R - S$ 也是随机变量。根据 $S$ 、 $R$ 的取值不同， $Z$ 值可能出现三种情况，当 $Z = R - S > 0$ 时，结构处于可靠状态；当 $Z = R - S = 0$ 时，结构达到极限状态；当 $Z = R - S < 0$ 时，结构处于失效(破坏)状态。 $Z = R - S = 0$ 成立时，结构处于极限状态的分界限，超过这一界限，结构就不能满足设计规定的某一功能要求。

### 3.2.2 结构的功能要求

#### (1) 结构的安全等级

建筑物的重要程度是根据其用途决定的。例如，设计一个大型体育馆和设计一个普通仓库，因为大型体育馆一旦发生破坏引起的生命财产损失要比普通仓库大得多，所以对它们的安全度的要求应该不同，进行建筑结构设计时应按不同的安全等级进行设计。建筑结构设计时，应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，采用不同的安全等级。建筑结构安全等级的划分应符合表 3—1 的要求。对人员比较集中使用频繁的影剧院、体育馆等，安全等级宜按一级设计。对特殊的建筑物，其设计安全等级可视具体情况确定。还有，建筑物中梁、柱等各类构件的安全等级一般应与整个建筑物的安全等级相同，对部分特殊的构件可根据其重要程度作适当调整。

表 3—1 建筑结构的安全等级

安全等级	破坏后果	建筑物类型
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

注：1 对特殊的建筑物，其安全等级应根据具体情况另行确定；

2 地基基础设计安全等级及按抗震要求设计时建筑结构的安全等级，尚应符合国家现行有关规范的规定。

#### (2) 结构的设计使用年限

计算结构可靠度所依据的年限称为结构的设计使用年限。结构的设计使用年限，是指设计规定的结构或结构构件不需进行大修即可按其预定目的使用的时期。设计使用年限按《建筑结构可靠度设计统一标准》确定，就总体而言，桥梁应比房屋的

设计使用年限长，大坝的设计使用年限更长。结构的设计使用年限应按表 3—2 采用。

表 3—2 设计使用年限分类

类别	设计使用年限(年)	示例
1	5	临时性结构
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物

注意，结构的设计使用年限虽与其使用寿命有联系，但不等同。超过设计使用年限的结构并不是不能使用，而是指它的可靠度降低了。

### (3) 建筑结构的性能

根据我国《建筑结构可靠度设计统一标准》，结构在规定的性能使用年限内应满足下列性能要求：

- (1) 在正常施工和正常使用时，能承受可能出现的各种作用；
- (2) 在正常使用时具有良好的工作性能；
- (3) 在正常维护下有足够的耐久性能；
- (4) 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。

上述(1)、(4)两项属于结构的安全性，结构应能承受正常施工和正常使用时可能出现的各种荷载和变形，在偶然事件(如地震、爆炸等)发生时和发生后保持必需的整体稳定性，不致发生倒塌。纽约世界贸易中心双塔大厦遭恐怖分子飞机撞击，产生爆炸、燃烧而最终导致整体倒塌，是一个非常典型的事例。(2)关系到结构的适用性，如不产生影响使用的过大变形或振幅，不发生足以让使用者不安的过宽的裂缝等。(3)为结构的耐久性，如结构在正常维护条件下在设计规定的年限内混凝土不发生严重风化、腐蚀、脱落，钢筋不发生锈蚀等。安全性、适用性和耐久性总称为结构的可靠性。

#### 3.2.3 结构性能的极限状态

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性能要求，这个特定状态称为该性能的极限状态，例如，构件即将开裂、倾覆、滑移、压屈、失稳等。也就是，能完成预定的各项性能时，结构处于有效状态，反之，则处于失效状态，有效状态和失效状态的分界，称为极限状态，是结构开始失效的标志。

极限状态可分为二类。

### (1) 承载能力极限状态

结构或结构构件达到最大承载能力或不适于继续承载的变形，称为承载能力极限状态。当结构或构件由于材料强度不够而破坏，或因疲劳而破坏，或产生过度的变形而不能继续承载，结构或结构构件丧失稳定如压屈等；结构转变为机动体系时，结构或构件就超过了承载能力极限状态。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。

### (2) 正常使用极限状态

结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限度的状态称为正常使用极限状态。例如，当结构或结构构件出现影响正常使用或外观的变形、过宽裂缝、局部损坏和振动时，可认为结构或构件超过了正常使用极限状态。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。

结构或构件按承载能力极限状态进行计算后，还应该按正常使用极限状态进行验算。

## 3.3 结构可靠度、可靠指标和目标可靠指标

结构的安全性、适用性和耐久性总称为结构的可靠性，也就是结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定功能的能力。而结构的可靠度则是结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定功能的概率，即结构可靠度是结构可靠性的概率度量。规定时间是指结构的设计使用年限，所有的统计分析均以该时间区间为准。所谓的规定条件，是指正常设计、正常施工、正常使用和维护的条件，不包括人为过失的影响，人为过失应通过其他措施予以避免。

结构的可靠度用可靠概率 $p_s$ 描述的。可靠概率 $p_s = 1 - p_f$ ， $p_f$ 为失效概率。这里，用荷载效应与结构抗力之间的关系来说明失效概率 $p_f$ 的计算方法。设构件的荷载效应 $S$ 、抗力 $R$ ，都是服从正态分布的随机变量且二者为线性关系。 $S$ 、 $R$ 的平均值分别为 $\mu_s$ 、 $\mu_R$ ，标准差分别为 $\sigma_R$ 、 $\sigma_s$ ，荷载效应为 $S$ 和抗力为 $R$ 的概率密度曲线如图3—1所示。按照结构设计的要求，显然 $\mu_R$ 应该大于 $\mu_s$ 。从图中的概率密度曲线可以看到，在多数情况下构件的抗力 $R$ 大于荷载效应 $S$ 。但是，由于离散性，在 $S$ 、 $R$ 的概率密度曲线的重叠区(阴影部分)，仍有可能出现构件的抗力 $R$ 小于荷载效应 $S$ 的情况。重叠区的大小与 $\mu_s$ 、 $\mu_R$ 以及 $\sigma_R$ 、 $\sigma_s$ 有关。 $\mu_R$ 比 $\mu_s$ 大的越多( $\mu_R$ 远离 $\mu_s$ )，或者 $\sigma_R$ 和 $\sigma_s$ 越小(曲线高而窄)，都会使重叠的范围减少。所以，重叠区的大小反映了抗力 $R$ 和荷载效应 $S$ 之间的概率关系，即结构的失效概率。重叠的范围越小，结构的失效概率越低。从结构安全的角度可知，提高结构构件的抗力(例如提高承载能力)，减小抗力 $R$ 和荷载效应 $S$ 的离散程度(例如减小不定因素的影响)，可以提高结构构件的可靠程度。所以，加大平均值之差 $\mu_R - \mu_s$ ，减小标准差 $\sigma_R$ 和 $\sigma_s$ 可以使失效概率越低。

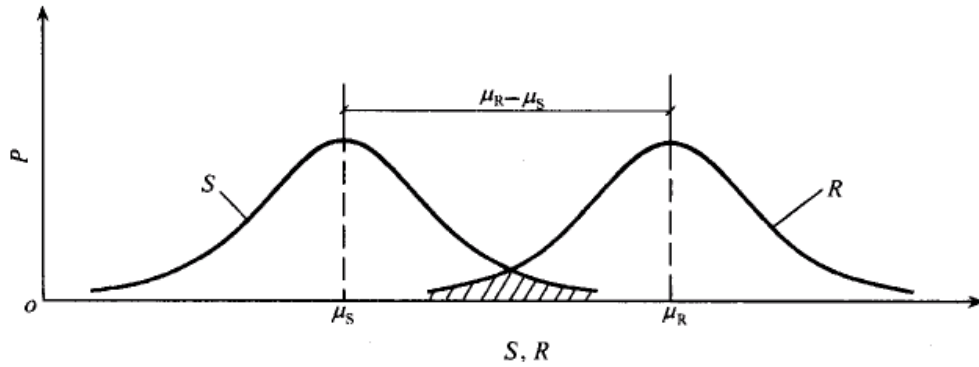


图3—1 R, S的概率密度分布曲线

同前，令 $Z=R-S$ ，功能函数 $Z$ 也应该是服从正态分布的随机变量。图3—2表示 $Z$ 的概率密度分布曲线。结构的失效概率 $p_f$ 可直接通过 $Z < 0$ 的概率来表达：

$$p_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f(Z) dZ = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_z \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{Z - \mu_z}{\sigma_z}\right)^2\right] dZ \quad (3-2)$$

用失效概率度量结构可靠性具有明确的物理意义，能较好地反映问题的实质。但 $p_f$ 的计算比较复杂，因而国际标准和我国标准目前都采用可靠指标 $\beta$ 来度量结构的可靠性。

从图3—2可以看到，取

$$\mu_z = \beta \sigma_z \quad (3-3)$$

则

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (3-4)$$

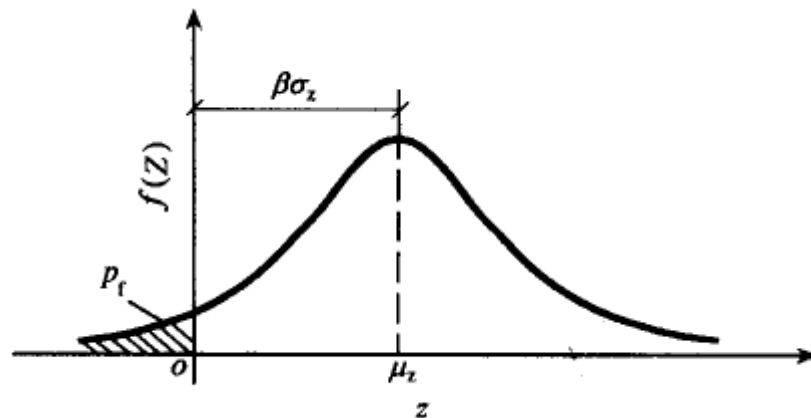


图3—2 可靠指标与失效概率关系示意图

可以看出 $\beta$ 大，则失效概率小。所以， $\beta$ 和失效概率一样可作为衡量结构可靠度的一个指标，称为可靠指标。 $\beta$ 与失效概率 $p_f$ 之间有一一对应关系。现将部分特殊值的关系列于表3—3。由公式(3—4)可知，在随机变量 $R$ 、 $S$ 服从正态分布时，只要知道 $\mu_S$ 、 $\mu_R$ 、 $\sigma_R$ 、 $\sigma_S$ 就可以求出可靠指标 $\beta$ 。

表3-3 可靠指标 $[\beta]$ 用与失效概率 $p_f$ 的对应关系

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

另一方面，结构按承载能力极限状态设计时，要保证其完成预定功能的概率不低于某一允许的水平，应对不同情况下的目标可靠指标 $\beta$ 值作出规定。结构和结构构件的破坏类型分为延性破坏和脆性破坏两类。延性破坏有明显的预兆，可及时采取补救措施，所以目标可靠指标可定得稍低些。脆性破坏常常是突发性破坏，破坏前没有明显的预兆，所以目标可靠指标就应该定得高一些。《建筑结构可靠度设计统一标准》根据结构的安全等级和破坏类型，在对代表性的构件进行可靠度分析的基础上，规定了结构构件承载能力极限状态的可靠指标不应小于表3-4的规定。结构构件正常使用极限状态的可靠指标，根据其可逆程度宜取0~1.5。

表3-4 结构构件承载能力极限状态的目标可靠指标

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

### 3.4 极限状态设计表达式

#### 3.4.1 承载能力极限状态设计表达式

##### (1) 基本表达式

令 $S_k$ 为荷载效应的标准值(下标k意指标准值)， $\gamma_s (\geq 1)$ 为荷载分项系数，二者乘积为荷载效应的设计值。

$$S = \gamma_s S_k \quad (3-5)$$

同样，令 $R_k$ 为结构抗力标准值， $\gamma_R (> 1)$ 为抗力分项系数，二者之商为抗力的设计值。

$$R = R_k / \gamma_R \quad (3-6)$$

$$R = R(f_c, f_s, \alpha_k, \dots)$$

式中， $f_c, f_s$ ——混凝土、钢筋的强度设计值； $\alpha_k$ ——几何参数的标准值，当几何参数的变异性对结构性能有明显的不利影响时，可另增减一个附加值。

为了充分考虑材料的离散性和施工中不可避免的偏差带来的不利影响，再将材料强度标准值除以一个大于1的系数，即得材料强度设计值，相应的系数称为材料的分项系数，即

$$f_c = f_{ck} / \gamma_c, \quad f_s = f_s / \gamma_s \quad (3-7)$$

确定钢筋和混凝土材料分项系数时，对于具有统计资料的材料，按设计可靠指标  $[\beta]$  通过可靠度分析确定。确定钢筋和混凝土材料分项系数时，先通过对钢筋混凝土轴心受拉构件进行可靠度分析(此时构件承载力仅与钢筋有关，属延性破坏，取  $[\beta] = 3.2$ )，求得钢筋的材料分项系数  $\gamma_s$ ，再根据已经确定的  $\gamma_s$ ，通过对钢筋混凝土轴心受压构件进行可靠度分析(此时属于脆性破坏，取  $[\beta] = 3.7$ )，求出混凝土的材料分项系数  $\gamma_c$ 。根据这一原则确定的混凝土材料分项系数  $\gamma_c = 1.4$ ；热轧钢筋(包括HPB235，HRB335，HRB400和RRB400级钢筋)的材料分项系数  $\gamma_s = 1.1$ ；预应力钢筋(包括钢绞线、消除应力钢丝和热处理钢筋)  $\gamma_s = 1.2$ 。

此外，考虑到结构安全等级的差异，其目标可靠指标应作相应的提高或降低，故引入结构重要性系数  $\gamma_0$ 。由

$$\gamma_0 S \leq R \quad (3-8)$$

式中， $\gamma_0$ ——结构构件重要性系数，与安全等级对应，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。

上式是极限状态设计的基本表达式。

## (2) 荷载效应组合的设计值 $S$

对于基本组合，荷载效应组合的设计值  $S$  应从下组合值中取最不利值确定：

1) 由可变荷载效应控制的组合

$$S = \gamma_G S_{GK} + \gamma_{Q1} S_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{QiK} \quad (3-9)$$

2) 由永久荷载效应控制的组合

$$S = \gamma_G S_{GK} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{QiK} \quad (3-10)$$

式中， $\gamma_G$ 、 $\gamma_{Qi}$ ——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  $\gamma_G$  取1.2，对由永久荷载效应控制的组合一般  $\gamma_G$  取1.35；当永久荷载效应对结构有利时，取  $\gamma_G = 1.0$ ，对结构的倾覆、滑移或漂浮验算，应取0.9； $\gamma_{Q1}$ 、 $\gamma_{Qi}$ ——第1个和第  $i$  个可变荷载分项系数，当可变荷载效应对结构构件承载能力不利时，一般取1.4，对标准值大于  $4\text{kN/m}^2$  的工业房屋楼面结构的活荷载应取1.3，



当可变荷载效应对结构构件的承载能力有利时，取为0。 $S_{GK}$ ——按永久荷载标准值计算的荷载效应值。 $S_{Q_{iK}}$ ——按可变荷载标准值计算的荷载效应值，其中 $S_{Q_{iK}}$ 为诸可变荷载效应中起控制作用者。 $n$ ——参照组合的可变荷载数。 $\psi_{ci}$ ——可变荷载的组合值系数，其值不应大于1.0。

当结构上作用几个可变荷载时，各可变荷载最大值在同一时刻出现的概率很小，若设计中仍采用各荷载效应设计值叠加，则可能造成结构可靠度不一致，因而必须对可变荷载设计值再乘以调整系数。荷载组合值系数 $\psi_{ci}$ 就是这种调整系数。除风荷载 $\psi_{ci}$ 取 $\psi_{ci}=0.6$ 外，大部分可变荷载取0.7，个别可变荷载取0.9~0.95(例如，对于书库、贮藏室的楼面活荷载取0.9)，对于一般排架、框架结构计算时，组合值系数取0.9，具体的计算时应按《荷载规范》取用。

按上述要求，在设计排架和框架结构时，往往是相当繁复的。因此，对于一般排架和框架结构，可采用简化规则，并按下列组合值中取最不利值确定：

由可变荷载效应控制的组合

$$S = \gamma_G S_{GK} + \gamma_{Q1} S_{Q_{1K}} \quad (3-11)$$

$$S = \gamma_G S_{GK} + 0.9 \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} S_{Q_{iK}} \quad (3-12)$$

由永久荷载效应控制的组合仍按公式(3-10)采用。

采用上述公式时，应根据结构可能同时承受的可变荷载进行荷载效应组合，并取其中最不利的组合进行设计。各种荷载的具体组合规则，应符合现行国家标准《荷载规范》的规定。对于偶然组合，其内力组合设计值应按有关的规范或规程确定。例如，当考虑地震作用时，应按现行国家标准《抗震规范》确定。此外，根据结构的使用条件，在必要时，还应验算结构的倾覆、滑移等。

### 3.4.2 正常使用极限状态设计表达式

按正常使用极限状态设计时，应验算结构构件的变形、抗裂度或裂缝宽度。由于结构构件达到或超过正常使用极限状态时的危害程度不如承载力不足引起结构破坏时大，故对其可靠度的要求可适当降低。因此，按正常使用极限状态设计时，对于荷载组合值，不需再乘以荷载分项系数，也不再考虑结构的重要性系数 $\gamma_0$ 。同时，由于荷载短期作用和长期作用对于结构构件正常使用性能的影响不同，对于正常使用极限状态，应根据不同的设计目的，分别按荷载效应的标准组合和准永久组合，或标准组合并考虑长期作用影响，采用下列极限状态表达式

$$S_d \leq C \quad (3-13)$$

式中， $C$ ——结构构件达到正常使用要求所规定的限值，例如变形、裂缝和应力等限值； $S_d$ ——正常使用极限状态的荷载效应(变形、裂缝和应力等)组合设计值。

### (1) 荷载效应组合

在计算正常使用极限状态的荷载效应组合值 $S_d$ 时，需首先确定荷载效应的标准组合和准永久组合。荷载效应的标准组合和准永久组合应按下列规定计算：

#### 1) 标准组合

$$S_K = S_{GK} + S_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} S_{QiK} \quad (3-14)$$

#### 2) 准永久组合

$$S_q = S_{GK} + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} S_{QiK} \quad (3-15)$$

式中， $S_K, S_q$ ——分别为荷载效应的标准组合和准永久组合的设计值； $\psi_{ci}, \psi_{qi}$ ——分别为第 $i$ 个可变荷载的组合值系数和准永久值系数。

必须指出，在荷载效应的准永久组合中，只包括了在整个使用期内出现时间很长的荷载效应值，即荷载效应的准永久值 $\psi_{qi} S_{ik}$ ；而在荷载效应的标准组合中，既包括了在整个使用期内出现时间很长的荷载效应值，也包括了在整个使用期内出现时间不长的荷载效应值。因此，荷载效应的标准组合值出现的时间是不长的。

#### 3) 频遇组合

对于频遇组合，荷载效应组合的设计值 $S$ 应按下列式计算

$$S = S_{GK} + \psi_{f1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{fi} S_{Qik} \quad (3-16)$$

式中， $\psi_{f1}$ 为可变荷载 $Q_1$ 的频遇值系数； $\psi_{fi}$ 为可变荷载 $Q_i$ 的频遇值系数。

### (2) 验算内容

正常使用极限状态的验算内容有：变形验算和裂缝控制验算(抗裂验算和裂缝宽度验算)。

#### 1) 变形验算

根据使用要求需控制变形的构件，应进行变形验算。对于受弯构件，按荷载效应的标准组合，并考虑荷载长期作用影响计算的最大挠度 $\Delta$ 不应超过挠度限值 $\Delta_{lim}$ 。

#### 2) 裂缝控制验算

结构构件设计时，应根据所处环境和使用要求，选用相应的裂缝控制等级，见附表1-15，并按下列规定进行验算。裂缝控制等级分为三级，其要求分别如下：

##### ① 一级——严格要求不出现裂缝的构件

按荷载效应的标准组合计算时，构件受拉边缘混凝土不应产生拉应力。

##### ② 二级——一般要求不出现裂缝的构件

按荷载效应标准组合计算时，构件受拉边缘混凝土拉应力不应大于混凝土轴心抗拉强度标准值。按荷载效应准永久组合计算时，构件受拉边缘混凝土不宜产生拉

应力。当有可靠经验时可适当放松。

③ 三级——允许出现裂缝的构件

按荷载效应标准组合，并考虑长期作用影响计算时，构件的最大裂缝宽度  $w_{\max}$  不应超过裂缝宽度限值  $w_{\text{lim}}$ ，见附表 1-15。

### 思考题

- 3.1 什么是结构上的作用？荷载属于哪种作用？作用效应与荷载效应有什么区别？
- 3.2 什么是结构抗力？影响结构抗力的主要因素有哪些？
- 3.3 什么是材料强度标准值和材料强度设计值？
- 3.4 什么是失效概率？什么是可靠指标？二者有何联系？
- 3.5 说明承载能力极限状态设计表达式中各符号的意义，并分析该表达式是如何保证结构的可靠度。
- 3.6 什么是结构的极限状态？结构的极限状态分为几类，其含义各是什么？
- 3.7 什么是结构的可靠度，建筑结构应该满足哪些功能要求？结构的设计工作寿命如何确定？结构超过其设计工作寿命是否意味着不能再使用？为什么？
- 3.8 对正常使用极限状态验算，为什么要区分荷载的标准组合和荷载的准永久组合？如何考虑荷载的标准组合和荷载的准永久组合？