



5.1 极限状态设计原则

引 入

建筑结构在正常设计、正常施工、正常使用及维修的条件下，在设计基准期内需满足安全性、适用性和耐久性的要求，这就必须具有一定的可靠度。可靠度越大，失效概率就越小，建筑结构的造价也越高。以概率理论为基础的极限状态设计法分为不同情况，由统计概率方法进行确定给出了不同的分项系数，以极限状态表达式进行设计计算的方法，可以将不同等级的建筑结构失效概率控制在规定的限值内，使其既安全可靠，又不会造价过高。

理论知识

5.1.1 建筑结构的设计基准期

1. 设计基准期

结构的设计基准期是指为确定可变作用及与时间有关的材料性能等取值而选用的时间参数。结构设计所采用的荷载统计参数、与时间有关的材料性能取值，都需要选定一个时间参数，它就是设计基准周期。结构保证其设计可靠度指标的时间期限称为设计基准期，即在基准期内，结构的可靠度指标完全满足设计要求；设计基准期是测算最大荷载重现期的基本期限；在超过设计基准期后，并非意味着结构的失效，而是其可靠度有所降低，因此基准期不能等同于建筑物的使用寿命。根据《建筑结构可靠度设计统一标准》(GB 50068)所考虑的荷载统计参数，我国多数建筑物的设计基准期均为 50 年，特殊建筑物可以除外。

2. 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，《建筑结构可靠度设计统一标准》采用的设计使用年限为：临时性结构 5 年；易于替换的结构构件 25 年；普通房屋和构筑物 50 年；纪念性建筑和特别重要的建筑结构 100 年。

3. 建筑寿命

建筑寿命是指从规划、实施到使用的总时间，即从确认需要建造开始直到建筑毁坏的全部时间。它不同于建筑结构的设计使用年限，也不等同于设计基准期。

5.1.2 建筑结构的性能要求

建筑结构在正常设计、正常施工、正常使用和正常维修条件下的性能要求有下列三项：

(1) 安全性建筑结构在其设计使用年限内应能够承受可能出现的各种作用，且在设计规定的偶然事件发生时及发生后，结构应能保持必需的整体稳定性，不至倒塌。

(2) 适用性建筑结构在其设计使用年限内应能满足预定的使用要求，有良好的工作性能，其变形、裂缝或

振动等性能均不超过规定的限值等。

(3) 耐久性建筑结构在其设计使用年限内应有足够的耐久性。例如,保护层厚度不得过薄、裂缝不得过宽以免引起钢筋锈蚀等。



5.1.3 结构可靠度和安全等级

结构可靠性是指结构在规定的时间内(即设计基准期),在规定的条件下(结构正常的设计、施工、使用和维修条件),完成预定功能(如承载力、刚度、稳定性、抗裂性、耐久性和动力性能等)的能力。需要说明的是,当建筑结构的使用年限达到或超过设计基准使用期后,并不意味着该结构立即报废不能使用了,而是说明它的可靠性水平从此要逐渐降低了,在做结构鉴定及必要加固后,仍可继续使用。

结构可靠度是指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。

结构可靠度的分析就是要合理地确定结构的可靠度水平,使结构设计符合技术先进、经济合理、安全适用和确保质量的要求。简而言之,进行建筑结构设计的基本目的,就是要采取最经济的手段,使结构在设计基准期内,具有各种预期的功能。

安全可靠是结构设计的重要内容,所以在进行建筑结构的设计时,应根据结构破坏可能产生的各种后果(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。《建筑结构可靠度设计统一标准》对建筑结构的安全等级划分为三级,见表 5-1。

表 5-1 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	重要的房屋
二级	严重	一般的房屋
三级	不严重	次要的房屋

当然,对于特殊的建筑物,其安全等级可根据具体情况另行确定。对地基基础和按抗震要求设计的建筑结构,其安全等级尚应符合地基基础和抗震规范的规定。

建筑结构中各类构件的安全等级宜与整个结构同级,对其中部分结构构件的安全等级可进行调整,但不得低于三级。



5.1.4 结构的极限状态

结构的极限状态是指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规定的某一功能要求,此特定状态称为该功能的极限状态。

关于结构的各种极限状态,其标志及限值均有明确的规定,具体情况将于本书相应章节中分别叙述。《建筑结构可靠度设计统一标准》将结构的极限状态分为下列两类:

(1) 承载力极限状态,这种极限状态是对应于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。当结构或结构构件出现了下列状态之一时,应认为超过了承载力极限状态:

① 整个结构或结构构件的一部分作为刚体失去平衡,如雨篷压重不足而倾覆、烟囱抗风不足而倾倒、挡土墙抗滑不足在土压力作用下而整体滑移等。

② 结构构件或其连接因超过材料强度而破坏(包括疲劳破坏),如轴心受压构件中混凝土达到了轴心抗压强度、构件的钢筋因锚固长度不足而被拔出等,或因变形过大而不适于继续承受荷载。



③结构转变为机动体系，如构件发生三铰共线而形成机动体系，丧失承载能力。

④结构或构件丧失稳定，如细长柱到达临界荷载后压屈失稳而破坏。

(2)正常使用极限状态，这种极限状态是对应于结构或结构构件达到正常使用或耐久性能的某项规定限值。当出现下列状态之一时，应认为结构或结构构件超过了正常使用极限状态：

①影响正常使用或外观的变形，如吊车梁变形过大导致吊车不能正常行驶、梁挠度过大影响外观等。

②影响正常使用或耐久性能的局部损坏，如水池池壁开裂漏水不能正常使用；裂缝过宽导致钢筋锈蚀等。

③影响正常使用的振动，如由于机器振动而导致结构的振幅超过按正常使用要求所规定的限值等。

④影响正常的其他特定状态，如相对沉降量过大等。



5.1.5 结构上的作用 F 、作用效应 S 、结构抗力 R

《建筑结构可靠度设计统一标准》对结构上的作用有明确的阐述。结构上的作用是指施加在结构上的集中荷载或分布荷载(包括永久荷载、可变荷载等)，以及引起结构外加变形或约束变形的原因，如基础沉降、温度变化、混凝土收缩、焊接等作用，这些作用使结构产生内力和变形。施加在结构上的集中荷载和分布荷载(即永久荷载或称恒载、可变荷载或称活载等)称为直接作用，引起结构外加变形和约束变形的其他作用称为间接作用。

结构上的作用按《建筑结构可靠度设计统一标准》可做下列分类。

1. 按随时间的变异分类

(1)永久作用。在设计基准期内其量值不随时间变化，或其变化与平均值相比可以忽略不计的作用。例如，结构自重、土压力、预加应力、焊接等。

(2)可变作用。在设计基准期内其量值随时间变化，且其变化与平均值相比不可忽略的作用。如安装荷载、楼面活荷载、风荷载、雪荷载、吊车荷载、温度变化、地震等。

(3)偶然作用。在设计基准期内出现或不一定出现，而一旦出现其量值很大且持续时间很短的作用。如罕遇地震、爆炸、撞击等。

2. 按随空间位置的变异分类

(1)固定作用。在结构空间位置上具有固定分布的作用。如楼面上的固定设备荷载、结构构件自重等。

(2)可动作用。在结构空间位置上的一定范围内可以任意分布的作用。如楼面上的人员荷载、吊车荷载等。

3. 按结构的反应分类

(1)静态作用。使结构产生的加速度可忽略不计的作用。如结构自重、住宅与办公楼的楼面活荷载等。

(2)动态作用。使结构产生的加速度不可忽略的作用。如地震、吊车荷载、设备振动、风荷载等。

作用效应 S 是指由于直接作用或间接作用(荷载、温度、支座不均匀沉降等因素)作用于结构构件上，在结构内产生的内力和变形(如轴力、弯矩、剪力、扭矩、挠度、转角和裂缝等)。若作用为直接作用，则其效应也可称为荷载效应，荷载与荷载效应在一般情况下是线性关系，故而荷载效应可用荷载值乘以荷载效应系数来表达。结构上的作用 F ，除永久作用外，都是不确定的随机变量，有时还与时间参数，甚至还与空间参数有关，所以作用效应 S ，一般来说也是随机变量或随机过程，甚至是随机的，宜采用概率论或随机振动的方法来予以描述。

结构抗力 R 是指结构或结构构件承受内力和变形的能力(如构件的承载能力、刚度等)。由于影响结构构件抗力的主要因素，如材料性能 f (材质、强度、弹性模量、工艺、环境等)、几何参数(制作尺寸的偏差、安装误差)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的不够精确)都是不确定的随机变量，所以由这些因素综合而成的结构抗力 R 也是随机变量。



5.1.6 结构的极限状态方程

混凝土结构和结构构件的工作情况究竟怎样？是工作良好、安全可靠？还是达到了极限状态结构失效？可以由该结构构件所承受的荷载效应 S 和结构抗力 R 两者的关系来描述，其表达式即为结构的极限状态方程，为

$$Z = R - S \geq 0 \quad (5-1)$$

当 $Z > 0$ 时，结构处于可靠状态；当 $Z < 0$ 时，结构处于失效状态；当 $Z = 0$ 时，结构处于极限状态。即当基本变量满足极限状态方程时：

$$Z = R - S = 0 \quad (5-2)$$

则结构达到极限状态，如图 5-1 所示。

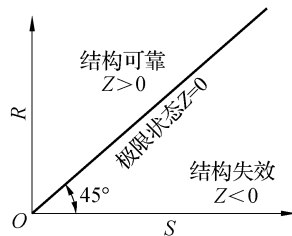


图 5-1 结构极限状态



常见问题解析

1. 建筑结构的概念？

建筑结构是由梁、板、柱或墙、基础等基本构件组成的承受各种外部作用的骨架体系。楼板的主要作用是承受竖向荷载；梁的主要作用是承受板传来的竖向荷载并将其传递至柱或墙；柱或墙的主要作用是承受梁传来的荷载并将其传递至基础；基础的主要作用是承受柱或墙传来的荷载并将其传递至地基。建筑结构荷载的传递路线是：板面上的竖向荷载→板→梁→柱或墙→基础→地基。

2. 建筑结构设计的任务是什么？

答：建筑结构设计要解决的根本问题，就是按荷载大小及结构要求确定构件的基本断面尺寸。选择荷载的大小和构件材料及尺寸，是在结构的可靠与经济之间选择一种合理的平衡，力求以最经济的途径，使所建造的结构以适当的可靠度满足各种预定的功能要求。

5.2 荷载和材料强度的取值



引入

设计中进行极限状态计算所采用的荷载及材料强度量值，根据不同极限状态的设计要求，需要确定不同的统计值，即对各种荷载及材料强度规定其代表值，以作为设计取值的依据。这些代表值有哪些？如何确定？



5.2.1 荷载代表值

1. 荷载的统计特性

我国对建筑结构的各种恒载、几种主要类型的民用楼面活载、风荷载，以及雪荷载等进行了大量的调查和实测工作，将所取得的资料和数据进行统计处理，获得了这些荷载的概率分布函数及统计参数，并以此作为确定各种荷载的代表值、荷载组合，以及进行结构可靠度计算的基础。

(1) 永久荷载。在建筑结构中，如屋面、楼面、墙体、梁、柱等构件和找平层、保温层等的自重都是永久荷载。永久荷载的重量在结构使用期内，随时间因素的变化不大，或其重量的变化与其平均值相比可以忽略。检验表明，绝大部分永久荷载的概率分布服从正态分布。

(2) 可变荷载。建筑结构所承受的楼面活荷载、风荷载、雪荷载以及吊车荷载等均为可变荷载。可变荷载在结构使用期内，随时间因素的变化较大，且其重量的变化与其平均值相比不可以忽略不计，其随时间的变异可统一用随机过程来描述。对可变荷载随机过程的样本函数经处理之后，即可得到各种可变荷载在任意时点的概率分布和在基准使用期最大值的概率分布。

2. 荷载的代表值

可变荷载有四种代表值，即标准值、组合值、准永久值和频遇值。其中标准值称为基本代表值，其他代表值可由基本代表值乘以相应的系数得到。各类可变荷载和相应的组合值系数、准永久值系数、频遇值系数可在荷载规范中查到。对于永久荷载，规定以其标准值作为代表值；对于可变荷载，则以其标准值、组合值、准永久值及频遇值作为代表值；对于偶然荷载，其代表值可按有关规定确定。

(1) 荷载标准值。各种荷载标准值是建筑结构按承载能力极限状态设计时采用的荷载基本代表值，为其设计基准期内最大荷载统计分布值。

① 永久荷载的标准值可按构件的设计尺寸和材料容重的标准值确定。对于构件的自重和重量变化不大的材料，一般取实际概率分布的平均值作为其荷载标准值。但是，对于有些自重变异较大的材料或结构构件，其单位重量的确定，则应按是否对结构不利来考虑，取单位重量的上限值还是下限值。

② 可变荷载的标准值宜统一由设计基准期最大荷载概率分布的某一分位数确定，例如，取为设计平均值加 1.645 倍标准差，即具有 95% 保证率的上分位值，即 $\mu_f(1+1.645\delta_f)$ 。但实际上目前对很多种可变荷载的调查研究还远远不够，难以估计出其概率分布，其大部分荷载的取值还是沿用或参照了传统习用的数值，如我国办公楼和住宅的楼面活荷载标准值均取为 2.0 kN/m^2 ；我国确定标准风荷载的基本风压是按当地比较空旷、平坦的地面，在离地 10 m 高处，以统计得到的 50 年一遇 10 分钟平均最大风速 $v(\text{m/s})$ 为标准，按 $v^2/1600$ 确定的风压值；而雪荷载标准值的基本雪压，是按一般空旷、平坦地面上统计得到的 50 年一遇最大积雪自重为标准而确定的，等等。

《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012) 已给出了各种可变荷载的标准值，设计时可以直接查用(表 5-2、表 5-3)。

表 5-2 民用建筑楼面均布活荷载标准值及其组合值、频遇值和准永久值系数

项次	类别		标准值/(kN/m ²)	组合值系数 ψ_c	频遇值系数 ψ_f	准永久值系数 ψ_q	
1	(1)住宅、宿舍、旅馆、办公楼、医院病房、托儿所、幼儿园		2.0	0.7	0.5	0.4	
	(2)实验室、阅览室、会议室、医院门诊室		2.0	0.7	0.6	0.5	
2	教室、食堂、餐厅、一般资料档案室		2.5	0.7	0.6	0.5	
3	(1)礼堂、剧场、影院、有固定座位的看台		3.0	0.7	0.5	0.3	
	(2)公共洗衣房		3.0	0.7	0.6	0.5	
4	(1)商店、展览厅、车站、港口、机场大厅及其旅客等候室		3.5	0.7	0.6	0.5	
	(2)无固定座位的看台		3.5	0.7	0.5	0.3	
5	(1)健身房、演出舞台		4.0	0.7	0.6	0.5	
	(2)运动场、舞厅		4.0	0.7	0.6	0.3	
6	(1)书库、档案库、贮藏室		5.0	0.9	0.9	0.8	
	(2)密集柜书库		12.0	0.9	0.9	0.8	
7	通风机房、电梯机房		7.0	0.9	0.9	0.8	
8	汽车通道及客车停车库	(1)单向板楼盖(板跨不小于2 m)和双向板楼盖(板跨不小于3 m×3 m)	客车	4.0	0.7	0.7	0.6
			消防车	35.0	0.7	0.5	0.0
		(2)双向板楼盖(板跨不小于6 m×6 m)和无梁楼盖(板跨不小于3 m×3 m)	客车	2.5	0.7	0.7	0.6
			消防车	20.0	0.7	0.5	0.0
9	厨房	(1)餐厅	4.0	0.7	0.7	0.7	
		(2)其他	2.0	0.7	0.6	0.5	
10	浴室、卫生间、盥洗室		2.5	0.7	0.6	0.5	
11	走廊、门厅	(1)宿舍、旅馆、办公楼、医院病房、托儿所、幼儿园	2.0	0.7	0.5	0.4	
		(2)办公楼、餐厅、医院门诊部	2.5	0.7	0.5	0.5	
		(3)教学楼及其他可能出现人员密集的情况	3.5	0.7	0.5	0.3	
12	楼梯	(1)多层住宅	2.0	0.7	0.5	0.4	
		(2)其他	3.5	0.7	0.5	0.3	
13	阳台	(1)可能出现人员密集的情况	3.5	0.7	0.6	0.5	
		(2)其他	2.5	0.7	0.6	0.5	



表 5-3 屋面均布活荷载标准值及其组合值、频遇值和准永久值系数

项次	类别	标准值/(kN/m ²)	组合值系数 ψ_c	频遇值系数 ψ_f	准永久值系数 ψ_q
1	不上人的屋面	0.5	0.7	0.5	0.0
2	上人的屋面	2.0	0.7	0.6	0.4
3	屋顶花园	3.0	0.7	0.6	0.5
4	屋顶运动场地	3.0	0.7	0.6	0.4

作用在楼面上的可变荷载,并非按表 5-2 中标准值的大小同时布满所有的楼面,因此,在确定梁、墙、柱和基础时,还要考虑实际荷载沿楼面的分布情况,应按楼面可变荷载标准值乘以折减系数来计算。

a. 设计楼面梁时的折减系数。

(a)第 1(1)项,当楼面梁从属面积超过 25 m²时,应取 0.9。

(b)第 1(2)~7 项,当楼面梁从属面积超过 50 m²时,应取 0.9。

(c)第 8 项,单向板楼盖的次梁和槽形板的纵肋应取 0.8,单向板楼盖的主梁应取 0.6,双向板楼盖的梁应取 0.8。

(d)第 9~13 项,应采取与所属房屋类别相同的折减系数。

b. 设计墙、柱和基础时的折减系数。

(a)第 1(1)项,应按表 5-4 规定的折减系数。

(b)第 1(2)~7 项,应采用与其楼面梁相同的折减系数。

(c)第 8 项,对单向板楼盖应取 0.5,对双向板楼盖和无梁楼盖应取 0.8。

(d)第 9~13 项,应采用与所属房屋类别相同的折减系数。

表 5-4 活荷载按楼层的折减系数

墙、柱、基础计算截面以上的层数	1	2~3	4~5	6~8	9~20	>20
计算截面以上各楼层活荷载总和的折减系数	1.00(0.90)	0.85	0.70	0.65	0.60	0.55

注:①楼面梁的从属面积应按梁两侧各延二分之一梁间距范围内的实际面积确定。

②当楼面梁的从属面积超过 25 m²时,应采用括号内的系数。

(2)荷载频遇值。可变荷载的频遇值是指在设计基准期内,其超越的总时间为规定的较小比率或超越频率为规定频率的荷载值。荷载频遇值是用于正常使用极限状态中验算时取用的荷载设计值。

(3)荷载准永久值。可变荷载的准永久值是指在设计基准期内,其超越的总时间约为设计基准期一半的荷载设计值。一般来说,是正常使用极限状态中所应用的荷载设计值。

在结构计算中应用的永久荷载(各种常用材料与构件的密度和单位自重)的标准值,以及各种可变荷载的标准值均详载于《建筑结构荷载规范》中。



5.2.2 材料强度标准值

混凝土结构在按极限状态方法设计时,钢筋和混凝土的强度是主要的因素,这两种材料的强度概率分布可用正态分布描述。材料强度的标准值是一种特征值,可取其概率分布的 0.05 分位数(具有不小于 95%的保证率)确定,其表达式为

$$f_k = \mu_f (1 - 1.645 \delta_f) \quad (5-3)$$

式中 f_k ——材料强度的标准值;

μ_f ——材料强度的平均值;

δ_f ——材料强度的变异系数。

1. 钢材的强度标准值

钢筋虽经科学冶炼和工业生产，但是由于材料的变异性，产品的质量仍然是不够均匀的。为了保证质量，冶金部门规定产品要做抽样检查，在既保证钢材的可靠性又顾及钢厂的经济核算的前提下制定有关标准值，称为废品限值，每个抽样试件的屈服强度低于此限值的就是废品，不得以合格品出厂。我国各级热轧钢筋的屈服强度平均值减去两倍标准差所得的数值，约等于冶金部门颁布的各相应钢种屈服强度的废品限值，其保证率为97.73%。为使钢筋屈服强度的标准值与其检验标准协调一致，《建筑结构荷载规范》将热轧钢筋的强度标准值取为冶金部门颁布的屈服强度废品限值。

2. 混凝土的强度标准值

混凝土的强度分布与钢筋强度的变化规律相似，不过离散程度比钢材要大得多，因此《建筑结构荷载规范》规定混凝土的强度标准值取为混凝土强度平均值减去1.645均方差，即按式(5-3)进行计算。



常见问题解析

1. 什么是荷载标准值？什么是活荷载的频遇值和准永久值？

答：从理论上讲，某一荷载的标准值应按其具有一定保证率的条件反推得出的。例如，假定其服从正态分布，如果要求95%的保证率，则：荷载标准值=荷载平均值+1.645×荷载标准差。但由于历史的原因和荷载的复杂性，现行《建筑结构荷载规范》中的荷载标准值基本沿用原规范的标准值。

可变荷载的频遇值系数，是根据在设计基准期内可变荷载超越的总时间或超越的次数来确定的。荷载的频遇值系数乘以可变荷载标准值所得的乘积称为荷载的频遇值。

荷载的准永久值为可变荷载标准值与其准永久值系数的乘积，荷载的准永久值系数是根据在设计基准期内荷载达到和超过该值的总持续时间与设计基准期内总持续时间的比值而确定的。

2. 荷载标准值和荷载设计值与荷载分项系数、材料强度标准值和设计值与材料分项系数之间的关系是什么？

答：按不小于95%的保证率确定材料强度和荷载效应的标准值。材料强度的标准值除以材料分项系数即为其设计值。荷载效应的标准值乘以荷载分项系数即为其荷载效应设计值。分项系数均大于1.0。

5.3 概率统计极限状态设计方法

引 入

以概率理论为基础的极限状态设计法就是以结构的失效概率来确定结构的可靠度。失效概率和可靠度之间有什么关联？可靠度如何由可靠指标来表达？《建筑结构可靠度设计统一标准》对不同等级的结构要求达到的目标可靠指标是如何规定的？在实际工程中，是如何采用分项系数实用表达式对承载力极限状态和正常使用极限状态进行设计计算的？



理论知识

5.3.1 可靠度、失效概率、可靠指标

结构可靠性是结构安全性、适用性和耐久性的概称，即指结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定的功能的能力。而结构可靠度就是结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定的功能的概率，称为结构可靠度。

采用概率统计的结构安全度的数学描述，可取极限状态方程 $Z=R-S \geq 0$ 中的基本变量 R 与 S 为随机变量，并以此确定可靠度指标和设计表达式。结构能够完成预定功能 $Z > 0$ 或 $R > S$ 的概率就是可靠概率，用 P_s 代表；结构不能完成预定功能 $Z < 0$ 或 $R < S$ 的概率即为失效概率，用 P_f 代表。可靠概率与失效概率有着互补的关系，即

$$P_s + P_f = 1 \quad (5-4)$$

若功能函数中的基本变量 R 与 S 均为正态分布，且极限状态方程为线性方程，则 R 、 S 、 Z 的概率密度函数形式如图 5-2 所示。图中纵坐标之左用 P_f 表示的部分的面积就是失效概率。

$$P_f = P(Z = R - S \leq 0) = \int_{-\infty}^0 f_z(Z) dZ \quad (5-5)$$

图中因为 R 和 S 是随机变量，所以 Z 也是随机变量，是前二者的函数，由式(5-2)， $Z=R-S$ ，且假定 R 和 S 为相互独立的，则有

$$(\text{平均值}) \mu_z = \mu_R - \mu_S \quad (5-6-1)$$

$$(\text{标准差}) \sigma_z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (5-6-2)$$

$$(\text{变异系数}) \delta_z = \sigma_z / \mu_z \quad (5-6-3)$$

式中 μ_R 、 μ_S ——抗力和效应的平均值；

σ_R 、 σ_S ——抗力和效应的标准差。

由图 5-2 可知，当为正态分布时，结构的失效概率 P_f 与功能函数 Z 的平均值 μ_z 至原点的距离有关： $\mu_z = \beta \sigma_z$ ，即

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (5-7)$$

由式(5-7)可以看出， μ_R 与 μ_S 相距越大， β 也越大，即结构安全可靠；另外，在 μ_R 与 μ_S 不变的前提下， σ_R 与 σ_S 越小，即结构抗力与荷载离散性越小， β 就越大，这也表明结构越安全可靠。因此 β 和 P_f 一样，也可作为衡量结构可靠性的一个指标，故称 β 为结构的可靠度指标。且 β 与 P_f 具有数值上的对应关系，也具有对应的物理意义。已知 β ，即可求得 P_f ； β 越大， P_f 就越小，即结构越可靠。在表 5-5 的对应关系中， β 值相差 0.5，差一个量级。

表 5-5 可靠度指标 β 与失效概率 P_f 、可靠概率 P_s 的对应关系

β	$P_f(\%)$	$P_s(\%)$	β	$P_f(\%)$	$P_s(\%)$
1.00	15.87	84.13	3.50	0.023	99.977
2.00	2.275	97.725	3.55	0.019	99.981
2.70	0.35	99.65	3.60	0.016	99.984

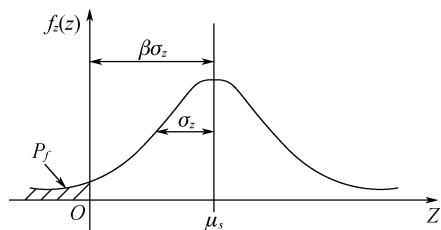


图 5-2 结构构件失效概率与可靠指标的关系

续表

β	$P_f(\%)$	$P_s(\%)$	β	$P_f(\%)$	$P_s(\%)$
3.00	0.135	99.865	3.65	0.013	99.987
3.10	0.097	99.903	3.70	0.011	99.989
3.15	0.082	99.918	3.75	0.009	99.991
3.20	0.069	99.931	3.80	0.007 2	99.992 8
3.25	0.058	99.942	3.85	0.005 9	99.994 1
3.30	0.048	99.952	3.90	0.004 8	99.995 2
3.35	0.04	99.96	3.95	0.003 9	99.996 1
3.40	0.034	99.966	4.00	0.003 2	99.996 8
3.45	0.028	99.972	4.20	0.001 3	99.978 7

用失效概率 P_f 来衡量结构可靠度,不但合理而且物理意义明确,所以《建筑结构可靠度设计统一标准》采用相应的可靠度指标 β 来衡量结构的可靠度。



5.3.2 目标可靠指标

结构构件设计时采用的可靠指标,可根据对现有结构构件的可靠度分析,并考虑使用经验和经济因素等确定。

根据工程经验,并通过对一些有代表性的钢筋混凝土构件的计算分析,《建筑结构可靠度设计统一标准》对延性破坏的构件,如轴心受拉与受弯构件,采用的容许失效概率 $[P_f]$ 取得略高一些,从而得出与之相应的可靠指标的平均值 $[\beta]$ 。例如,当延性破坏时,取 $[P_f]=6.9 \times 10^{-4}$, $[\beta]=3.2$ 。同理,《建筑结构可靠度设计统一标准》对脆性破坏的构件,如轴心受压与偏心受压构件,所取 $[P_f]$ 就偏低一些,例如,当脆性破坏时,取 $[P_f]=1.1 \times 10^{-4}$, 其相应的 $[\beta]=3.7$ 。

《建筑结构可靠度设计统一标准》对一般工业与民用建筑结构所规定的、作为设计依据的可靠指标,称为目标可靠指标 $[\beta]$ 。对于不同安全等级的目标可靠指标 $[\beta]$ 列于表 5-6 中。当有充分依据时,目标可靠指标还可作幅度不超过 ± 0.25 的调整。结构构件承载能力极限状态的可靠指标,不应小于表 5-6 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 $0 \sim 1.5$ 。

表 5-6 结构构件承载能力极限状态的可靠指标

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

注: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。



5.3.3 极限状态设计表达式

当荷载的概率分布、统计参数以及材料性能、尺寸的统计参数已确定,根据上节规定的目标可靠指标 $[\beta]$,即可按照结构可靠度的概率分析方法进行结构设计。但是,这样进行设计对于一般性结构构件工作量很



大, 过于繁琐。考虑到使用上的简便, 和广大工程设计人员的习惯, 《建筑结构可靠度设计统一标准》没有推荐直接根据可靠指标 β 来进行结构设计, 仍然采用了工程设计人员熟悉的以基本变量的标准值和分项系数表达的结构构件实用设计表达式。

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

$$\gamma_0 S \leq R \quad (5-8)$$

$$R = R(f_c, f_s, a_k, \dots) \quad (5-9)$$

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, 按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009和现行国家标准《建筑抗震设计规范》(GB 50011)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} ;

$R(f_c, f_s, a_k, \dots)$ ——结构构件的承载力函数;

f_c, f_s ——分别为混凝土、钢筋的强度设计值;

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良影响时, 可另增减一个附加值。

(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进行计算, 必要时尚应按荷载效应的偶然组合进行计算。)

对于偶然组合荷载效应的设计值宜按下列规定确定: 偶然荷载的代表值不乘以分项系数; 与偶然荷载同时出现的其他荷载可根据观测资料和工程经验采用适当的代表值。

实际荷载效应中的荷载有永久荷载和可变荷载, 并且可变荷载不止一个, 多个可变荷载也不一定会同时发生, 例如, 高层建筑各楼层可变荷载全部满载且遇到最大风荷载的可能性就不大。为此, 考虑到两个或两个以上可变荷载同时出现的可能性较小, 引入荷载组合值系数对其标准值折减。按承载能力极限状态设计时, 应考虑作用效应的基本组合, 必要时尚应考虑作用效应的偶然组合, 本课程主要讨论基本组合。对于基本组合, 当荷载与荷载效应按线性关系考虑时, 其荷载效应组合的设计值 S , 应按公式(5-10)和公式(5-11)中最不利值确定。

(1) 由可变效应控制的组合

$$\gamma_0 S = \gamma_0 (\gamma_G S_{Gk} + \gamma_{Q1} S_{Q1k} + \sum_{n=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik}) \quad (5-10)$$

(2) 由永久荷载效应控制的组合

$$\gamma_0 S = \gamma_0 (\gamma_G S_{Gk} + \sum_{n=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{Qik}) \quad (5-11)$$

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, 可采用下述简化公式:

$$\gamma_0 S = \gamma_0 (\gamma_G S_{Gk} + \psi \sum_{n=1}^n \gamma_{Qi} S_{Qik}) \quad (5-12)$$

式中 γ_G ——永久荷载分项系数, 当永久荷载效应对结构构件的承载能力不利时, 对公式(5-10)和公式(5-11), 取 1.2, 对公式(5-12), 取 1.35; 当永久荷载效应对结构构件承载能力有利时, 不应大于 1.0;

γ_{Q1}, γ_{Qi} ——第 1 个和第 i 个可变荷载分项系数(表 5-7), 当可变荷载效应对结构构件承载能力不利时, 在一般情况下取 1.4; 当可变荷载效应对结构构件的承载能力有利时取 0;

S_{Gk} ——永久荷载标准值的效应;

S_{Q1k} ——在基本组合中起控制作用的一个可变荷载标准值的效应;

S_{Qik} ——第 i 个可变荷载标准值的效应；

ψ_{ci} ——第 i 个可变荷载的组合值系数，其值不应大于 1.0；

n ——可变荷载的个数；

ψ ——简化设计表达式中采用的荷载组合值系数，一般情况下可取 $\psi=0.9$ ，当只有一个可变荷载时，取 1.0。

表 5-7 荷载分项系数的取值

荷载特性		荷载分项系数	
永久荷载 γ_G	永久荷载效应对结构不利	由可变荷载效应控制的组合	1.2
		由永久荷载效应控制的组合	1.35
	永久荷载效应对结构有利		1.0
	倾覆、滑移或飘浮验算		0.9
可变荷载 γ_Q	一般情况		1.4
	对标准值大于 4 kN/m ² 的工业房屋楼面结构的活荷载		1.3

采用公式(5-10)和公式(5-11)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《建筑结构荷载规范》的规定。

对于偶然组合，其内力组合设计值应按有关的规范与规程确定(表 5-8)。例如，当考虑地震作用时，应按现行国家标准《建筑抗震设计规范》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。

表 5-8 建筑结构安全等级、重要性系数、目标可靠度指标 $[\beta]$ 值

安全等级	破坏后果	建筑物类型	设计使用年限	结构重要性系数 γ_0	目标可靠度指标 $[\beta]$	
					延性破坏	脆性破坏
一级	很严重	重要房屋	≥ 100 年	1.1	3.7	4.2
二级	严重	一般房屋	50 年	1.0	3.2	3.7
三级	不严重	次要房屋	5 年	0.9	2.7	3.2

公式(5-8)中的 $\gamma_0 S$ ，在本书各章中用内力设计值(N 、 M 、 V 、 T 等)表示；对预应力混凝土结构，尚应考虑预应力效应。

【例 5-1】 某办公楼钢筋混凝土矩形截面简支梁，安全等级为二级，截面尺寸 $b \times h = 200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ ，计算跨度 $= 5 \text{ m}$ ，净跨度 $= 4.86 \text{ m}$ 。承受均布线荷载：活荷载标准值 7 kN/m ，永久荷载标准值 10 kN/m (不包括自重)。试计算按承载能力极限状态设计的跨中弯矩设计值和支座边缘截面剪力设计值。

【解】由表 5-2 查得活荷载组合值系数 $\psi_c = 0.7$ ，安全等级为二级，则结构重要性系数 $\gamma_0 = 1.0$ 。

钢筋混凝土的重度标准值为 25 kN/m^3 ，故梁自重标准值为 $25 \times 0.2 \times 0.4 = 2 \text{ kN/m}$ 。

总永久荷载标准值 $g_k = 2 + 10 = 12 \text{ kN/m}$ 。

永久荷载产生的跨中弯矩标准值和支座边缘截面剪力标准值分别为

$$M_{gk} = \frac{1}{8} g_k l_0^2 = \frac{1}{8} \times 12 \times 5^2 = 37.5 (\text{kN}\cdot\text{m})$$

$$V_{gk} = \frac{1}{2} g_k l_n = \frac{1}{2} \times 12 \times 4.86 = 29.16 (\text{kN})$$

活荷载产生的跨中弯矩标准值和支座边缘截面剪力标准值分别为



$$M_{qk} = \frac{1}{8} q_k l_0^2 = \frac{1}{8} \times 7 \times 5^2 = 21.875 (\text{kN/m})$$

$$V_{qk} = \frac{1}{2} q_k l_n = \frac{1}{2} \times 7 \times 4.86 = 17.01 (\text{kN})$$

(1) 可变荷载弯矩控制的跨中弯矩设计值和支座边缘截面剪力设计值。本例只有一个活荷载, 即为第一可变荷载。故计算由可变荷载弯矩控制的跨中弯矩设计值时, $\gamma_G = 1.2$, $\gamma_Q = 1.4$ 。由式(5-10)得, 分别为

$$M = 1.0 \times (1.2 \times 37.5 + 1.4 \times 21.875) = 75.625 (\text{kN/m})$$

$$V = 1.0 \times (1.2 \times 29.16 + 1.4 \times 17.01) = 58.806 (\text{kN})$$

(2) 永久荷载弯矩控制的跨中弯矩设计值和支座边缘截面剪力设计值。计算由永久荷载弯矩控制的跨中弯矩设计值时, $\gamma_G = 1.35$, $\gamma_Q = 1.4$, $\psi_c = 0.7$ 。由式(5-11)得, 分别为

$$M = 1.0 \times (1.35 \times 37.5 + 0.7 \times 1.4 \times 21.875) = 72.063 (\text{kN/m})$$

$$V = 1.0 \times (1.35 \times 29.16 + 0.7 \times 1.4 \times 17.01) = 56.036 (\text{kN})$$

取较大值得: 跨中弯矩设计值 $M = 75.625 \text{ kN/m}$, 支座边缘截面剪力设计值 $V = 58.806 \text{ kN}$ 。

上例中只有一个可变荷载, 计算较简单。当结构上同时作用两个或两个以上可变荷载时, 需要判别其中哪一个可变荷载的效应最大(该可变荷载为第一可变荷载, 其余为第2至第 $n-1$ 个组合可变荷载), 这一工作通常比较麻烦。

【例 5-2】 某钢筋混凝土现浇教学楼, 其楼面板承受均布荷载, 其中永久荷载引起的跨中弯矩标准值为 $M_{gk} = 1.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 可变荷载引起的跨中弯矩标准值为 $M_{qk} = 1.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 构件的安全等级为二级, 试按承载力极限状计算板的跨中弯矩值。

【解】(1) 当可变荷载效应控制组合时,

$$\begin{aligned} M &= \gamma_G M_{gk} + \gamma_{Q1} M_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} M_{Qik} \\ &= 1.2 \times 1.8 + 1.4 \times 1.5 = 4.26 (\text{kN}) \end{aligned}$$

(2) 当永久荷载效应控制组合时,

$$\begin{aligned} M &= \gamma_G M_{gk} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} M_{Qik} \\ &= 1.35 \times 1.8 + 1.4 \times 0.7 \times 1.5 = 3.9 (\text{kN}) \end{aligned}$$

故板跨中最大弯矩设计值为 4.26 kN/m 。

为简化计算, 《建筑结构荷载规范》规定, 对于一般排架、框架结构, 可不区分第一个可变荷载和第 i 个可变荷载, 并采用相同的组合值系数, 其荷载效应组合设计值取由可变荷载效应控制和由永久荷载效应控制的组合值中的最不利值。

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和裂缝宽度。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没有承载力不足引起结构破坏时大, 故对其可靠度的要求可以适当降低。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 γ_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:

$$S_d \leq C \quad (5-13)$$

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。

$$S_d = \sum_{j=1}^n S_{Gjk} + S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} S_{Qik} \quad (5-14)$$

②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。

$$S_d = \sum_{j=1}^n S_{Gjk} + \psi_{f1} S_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{qi} S_{Qik} \quad (5-15)$$

③准永久组合主要用于当长期效应是决定性因素的情况。

$$S_d = \sum_{j=1}^n S_{Gjk} + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} S_{Qik} \quad (5-16)$$

式中 S_k , S_q ——分别为荷载效应的标准组合和准永久组合；

S_{Gjk} ——第 j 个永久荷载标准值的效应；

S_{Q1k} ——在基本组合中起控制作用的一个可变荷载标准值的效应；

S_{Qik} ——第 i 个可变荷载标准值的效应；

ψ_{ci} , ψ_{qi} , ψ_{fi} ——分别为第 i 个可变荷载的组合值系数、准永久值系数和频遇值系数。

必须指出的是，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 $\psi_{qi} S_{Qik}$ ；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。

(2)验算内容。正常使用极限状态的验算内容有如下几项：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 f 不应超过挠度限值 f_{lim} (表 5-9)，即

$$f \leq f_{lim} \quad (5-17)$$

表 5-9 受弯构件的挠度限值 f_{lim}

构件类型	楼盖、屋盖及楼梯构件			吊车梁	
	$l_0 < 7$ m	$7 \text{ m} \leq l_0 \leq 9$ m	$l_0 > 9$ m	手动吊车	电动吊车
挠度限值	$l_0/200(l_0/250)$	$l_0/250(l_0/300)$	$l_0/300(l_0/400)$	$l_0/500$	$l_0/600$

注：1. 表中 l_0 为构件的计算跨度；计算悬臂构件的挠度限值时，其计算跨度 l_0 按实际悬臂长度 2 倍取用。

2. 表中括号内的数值适用于使用上对挠度有较高要求的构件。

3. 构件制作的起拱值和预加力所产生的反拱值，不宜超过构件在相应荷载组合作用下的计算挠度值。

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：

a. 一级——严格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不应产生拉应力，即构件受拉边缘混凝土的应力 σ_{ctk} 应满足下列要求：

$$\sigma_{ctk} \leq 0 \quad (5-18)$$

b. 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，即构件受拉边缘混凝土的应力 σ_{ctk} 应满足下列要求：

$$\sigma_{ctk} \leq f_t \quad (5-19)$$

式中 f_t ——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，即构件受拉边缘混凝土的应力 σ_{eq}



应满足下列要求：

$$\sigma_{eq} \leq 0 \quad (5-20)$$

当有可靠经验时可适当放松。

c. 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不应超过裂缝宽度限值(表 5-10)，即

$$\omega_{\max} \leq \omega_{\lim} \quad (5-21)$$

表 5-10 结构构件的裂缝控制等级及最大裂缝宽度的限值(mm)

环境类别	钢筋混凝土结构		预应力混凝土结构	
	裂缝控制等级	ω_{\lim}	裂缝控制等级	ω_{\lim}
一	三级	0.30(0.40)	三级	0.20
二 a		0.20		
二 b			二级	—
三 a、三 b			一级	

注：1. 对处于年平均相对湿度小于 60% 地区一类环境的受弯构件，其最大裂缝宽度限值可采用括号内的数值。

2. 在一类环境下，对钢筋混凝土屋架、托架及需作疲劳验算的吊车梁，其最大裂缝宽度限值应取为 0.20 mm；对钢筋混凝土屋架梁和托梁，其最大裂缝宽度限值应取为 0.30 mm。

3. 对处于四类、五类环境下的结构构件，其裂缝控制要求应符合专门标准的有关规定。

4. 表中的最大裂缝宽度限值为用于验算荷载作用引起的最大裂缝宽度。

表 5-11 混凝土结构的环境类别(GB 50010—2010)

环境类别	条件
一	室内干燥环境；无侵蚀性静水浸没环境
二 a	室内潮湿环境；非严寒和非寒冷地区的露天环境；非严寒和非寒冷地区与无侵蚀性的水或土直接接触的环境；严寒和寒冷地区的冰冻线以下与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境
二 b	干湿交替环境 水位频繁变动的露天环境 严寒和寒冷地区的露天环境 严寒和寒冷地区冰冻线以上与无侵蚀性的水或土壤直接接触的环境
三 a	严寒和寒冷地区冬季水位变动区的环境；受除冰盐影响环境；海风环境
三 b	盐渍土环境；受除冰盐作用环境；海岸环境
四	海水环境
五	受人为或自然的侵蚀性物质影响的环境

3. 设计表达式中各分项系数的确定

在按极限状态设计表达式进行结构设计时，为了使所设计的结构构件在不同情况下具有规定的可靠度，因而采用了各种设计系数。分项系数实质上是目标可靠指标 $[\beta]$ 的化身，既保证了结构设计目标的实现，又方便了设计工作。兹分述如下：

(1) 荷载分项系数 γ_G 、 γ_Q 。荷载分项系数有两种：永久荷载分项系数 γ_G 和可变荷载分项系数 γ_Q 。主要是考虑不同变异性的荷载，按标准效应计算时，可能造成结构可靠度的严重不一致性而给予调整的系数。

荷载分项系数 γ_G 、 γ_Q 值是根据下列原则经优选确定的：即在各项荷载标准值已给定的条件下，要选取一

组分项系数,使按极限状态设计表达式设计所得的各种结构构件所具有的可靠指标,与规定的目标可靠指标之间在总体上差异最小。

(2)可变荷载的组合值系数 ψ_c 。结构上除作用有永久荷载外,有时还将作用几个可变荷载,如楼面活荷载 q 、风荷载 W 、雪荷载 S 以及其他荷载等。由概率分析可知,各荷载最大值在同一时刻出现的概率甚小,因此这种荷载组合在设计表达式中必须予以考虑。荷载组合值系数 ψ_c 就是考虑当两种或两种以上的可变荷载同时出现时,若在设计计算中仍采用设计值效应叠加而可能造成结构可靠度的不一致性,因而必须对可变荷载设计值再乘以调整系数。

ψ_c 是根据下述原则确定的:即在荷载标准值和荷载分项系数已给定的前提下,对于有两种或两种以上的可变荷载参与组合的情况,通过引入系数 ψ_c 对荷载标准值的折减,使按极限状态设计所得的各类结构构件所具有的可靠指标,与仅有一种可变荷载参与组合的简单组合情况下的可靠指标有最佳的一致性。 ψ_c 值的具体规定见式(5-11)等。

(3)结构重要性系数 γ_0 。结构重要性系数 γ_0 是考虑结构破坏后果严重性而引入的系数(表5-8)。对于安全等级,一级取1.1,二级取1.0,三级取0.9。

(4)混凝土和钢筋的材料强度分项系数 γ_c 、 γ_s 。在设计表达式(5-21)中所采用的混凝土和钢筋的强度设计值,其定义为强度标准值除以相应的材料强度分项系数,即

$$f_c = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \text{ 或 } f_s = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} \quad (5-22)$$

式中 f_c, f_s ——混凝土、钢筋的强度设计值;

f_{ck}, f_{sk} ——混凝土、钢筋的强度标准值;

γ_c, γ_s ——混凝土、钢筋的材料强度分项系数。

材料强度分项系数,主要是考虑了材料或构件的强度出现从不安全方面偏离标准值的可能性而引入的一个分项系数。

在确定混凝土和钢筋的材料强度分项系数时,对具有统计资料的材料,主要按照规定的可靠指标通过计算分析确定,《建筑结构可靠度设计统一标准》规定,对一般工业与民用建筑的结构构件在延性破坏时取可靠指标 $\beta=3.2$,在脆性破坏时取 $\beta=3.7$,而对统计资料不足的材料,则以工程经验为主要依据,通过对原规范结构构件材料的校准计算确定。

当确定钢筋的材料强度分项系数 γ_s 时,可通过对轴心受拉构件进行可靠度分析求得。此时,构件承载力仅与钢筋有关,与混凝土无关,属于延性破坏,取 $\beta=3.2$;当确定混凝土的材料强度分项系数 γ_c 时,则可根据已经确定的钢筋设计强度 f_s 的情况下,通过对轴心受压构件进行可靠度分析求得。此时,属于脆性破坏,取 $\beta=3.7$ 。

根据 β 分析,并适当考虑工程经验,对钢材,采用 $\gamma_s=1.1\sim 1.2$,对混凝土采用 $\gamma_c=1.40$ 。

【引入分析】

图5-3为现浇钢筋混凝土框架结构,由现浇的梁、板、柱和基础等构件组成,这些构件整体浇筑在一起。楼面是现浇的钢筋混凝土板,由框架梁支承着,柱支承着框架梁,柱固结于现浇钢筋混凝土基础内。如图5-5所示为构件布置示意图。

图5-4为砖混结构,由楼面梁、板、砌体墙和钢筋混凝土基础等构件组成,这些构件相互支承,形成受力骨架。楼面板支承在梁上,梁支承在墙上,墙体支承在基础上。如图5-6所示为其构件布置示意图。



图 5-3 框架结构

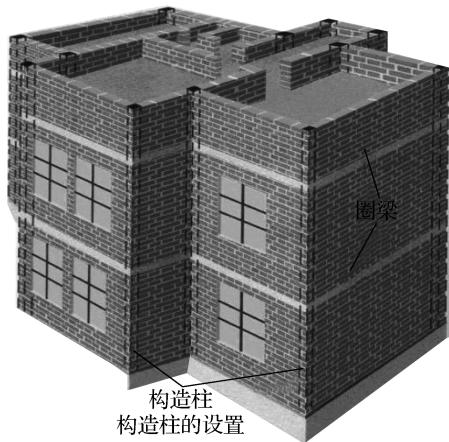


图 5-4 砖混结构

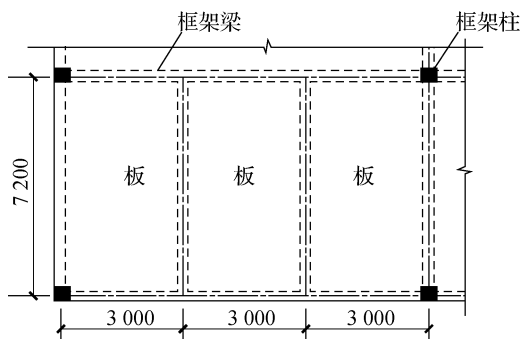


图 5-5 框架结构构件布置示意图

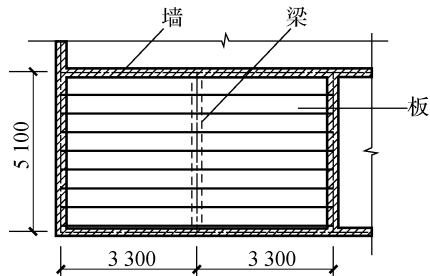


图 5-6 砖混结构构件布置示意图

分析说明：以上两个结构中，各种构件之间、构件与构件上作用的家具、人群之间存在着各种力的关系，房屋结构只有正确合理地承担着各种力的作用，才能安全地工作。掌握基本的建筑力学知识，这也是结构设计的第一步。



常见问题解析

1. 什么叫结构的可靠度和可靠指标？我国《建筑结构设计统一标准》对结构可靠度是如何定义的？

答：结构可靠性是指结构在规定时间(设计基准期)内，规定条件下(正常设计、正常使用和正常维修)能完成预定功能的能力，可靠度是其完成预定功能的概率。可靠指标为标准正态坐标系中原点至极限状态曲面的最短距离。在抗力和作用效应相互独立，且都服从正态分布的简单情况下：

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

2. 正态分布概率密度曲线有哪些数字特征？这些数字特征各表示什么意义？

答：正态分布概率密度曲线有三个数字特征。

(1) 平均值。它为随机变量取值的水平，它表示随机变量取值的集中位置。平均值越大，则分布曲线的高峰点离开纵坐标轴的水平距离越远。

(2) 标准差。它是随机变量方差的正二次方根，它表示随机变量的离散程度。标准差越大时，分布曲线越

扁平，说明变量分布的离散性越大。

$$\text{平均值: } \mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad \text{标准差: } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\mu - x_i)^2}{n-1}}。$$

(3) 变异系数。它为随机变量标准差除以其平均值的绝对值的商，它表示随机变量取值的相对离散程度。如果有两批数据，它们的标准差相同，但平均值不相同，则平均值较小的这组数据中，各观测值的相对离散程度较大。

$$\text{变异系数: } \delta = \frac{\sigma}{\mu}$$

3. 正态分布概率密度曲线有何特点?

答: (1) 曲线上有且只有一个高峰。

(2) 有一根对称轴。

(3) 当 x 趋于 $+\infty$ 或 $-\infty$ 时，曲线的纵坐标均趋于零。

(4) 对称轴左、右两边各有一个反弯点，反弯点也对称于对称轴。

4. 可靠概率 P_s 、失效概率 P_f 、可靠度 β 与极限状态表达式中的结构重要性系数、分项系数之间有什么关系?

答: 结构抗力 R 小于作用效应 S 的概率称为结构的失效概率 P_f ; 结构抗力 R 大于作用效应 S 的概率称为结构的可靠概率 P_s ，也称为结构的可靠度; 故失效概率 P_f 与可靠指标 β 之间有着内在联系，所以可用 β 表示结构的可靠度。《建筑结构荷载规范》根据结构的安全等级和破坏类型，规定了按承载能力极限状态设计时的目标可靠指标 $[\beta]$ 值。为了实用，给出了用结构重要性系数、荷载分项系数、材料分项系数等来表达供结构设计用的近似概率极限状态设计法表达式。

5. 什么是荷载的组合值? 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?

答: 当结构或其构件承受两种或两种以上荷载作用时，它们同时达到其标准值的概率将有所降低。因此，将其标准值乘以相应的组合系数而得到其组合值。

对标准组合，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。对频遇组合，主要用于当一个极限状态被超越时将产生局部损害、较大变形或短暂的情况。对准永久组合，主要用在当长期效应是决定性因素的情况。

按荷载的标准组合时，荷载效应组合的设计值应按下式计算:

$$S_k = C_G G_k + C_{Q1} Q_{1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{Ci} C_{Qi} Q_{ik}$$

按荷载的准永久组合时，荷载效应组合的设计值应按下式计算:

$$S_k = C_G G_k + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} C_{Qi} Q_{ik}$$

6. 我国《建筑结构荷载规范》承载力极限状态设计表达式采用何种形式? 说明式中各符号的物理意义及荷载效应基本组合的取值原则。

答: 对于承载力能力极限状态，结构构件应按荷载效应的基本组合或偶然组合，采用下列极限状态设计表达式:

$$\begin{aligned} \gamma_0 S &\leq R \\ R &= R(f_c, f_s, a_k, \dots) \end{aligned}$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数;

S ——荷载效应组合的设计值;



- R ——结构构件的承载力设计值；
 $R(\cdot)$ ——结构构件的承载力函数；
 f_c, f_s ——混凝土、钢筋的强度设计值；
 a_k ——几何参数的标准值。

上式中的 $\gamma_0 S$ ，在《建筑结构荷载规范》各章中用内力设计值(N 、 M 、 V 、 T 等)表示；对预应力混凝土结构，除应根据使用条件进行承载力计算及变形、抗裂、裂缝宽度和应力验算外，尚应按具体情况对制作、运输及安装等施工阶段进行验算。

《建筑结构荷载规范》规定：对于基本组合，荷载效应组合的设计值应从由可变荷载效应控制的组合和由永久荷载效应控制的组合中取最不利值确定。

思考与练习

一、单选题

- 结构的()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。
 A. 安全性 B. 适用性 C. 耐久性 D. 可靠性
- 可变荷载中作用时间占设计基准期内总持续时间超过 50% 的荷载值，称为()。
 A. 荷载设计值 B. 荷载标准值
 C. 荷载频遇值 D. 可变荷载准永久值
- 混凝土强度等级 C 是由立方体抗压强度试验值按()原则确定的。
 A. 取平均值，超值保证率 50% B. 取标准值，超值保证率 95%
 C. 取标准值，超值保证率 97.72% D. 取标准值，超值保证率 85.5%
- 《混凝土结构设计规范》对混凝土结构的目标可靠指标要求为 3.7(脆性破坏)和 3.2(延性破坏)时，该建筑结构的安全等级属于()。
 A. 一级，重要建筑 B. 二级，重要建筑
 C. 二级，一般建筑 D. 三级，次要建筑
- 当楼面均布活荷载大于或等于 4 kN/m^2 时，可变荷载分项系数等于()。
 A. 1.3 B. 1.2 C. 1.0 D. 1.4

二、多选题

- 下列情况属于超出正常使用极限状态的情况的是()。
 A. 保护层脱落 B. 现浇双向板楼面在人行走动中振动较大
 C. 连续梁中间支座产生塑性铰 D. 构件丧失稳定
- 现行《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)度量混凝土结构可靠性的原则是()
 A. 用分项系数和结构重要性系数，不计失效率
 B. 用分项系数和结构重要性系数，考虑失效率
 C. 用可靠指标 β 表示，不计失效率
 D. 用可靠指标 β 表示，考虑失效率

三、综合题

- 一跨度为 4 m 的简支梁，承受自重 $g_k = 3 \text{ kN/m}$ 的均布线荷载，跨中作用有 $Q_k = 10 \text{ kN}$ 的集中可变荷载，安全等级取二级，可变荷载的组合值系数取 0.7，求梁的不利荷载效应设计值。
- 某钢筋混凝土地沟板，板厚 70 mm，宽 500 mm，板上抹灰为 20 mm 厚水泥砂浆，地面标准活荷载 2.50 kN/m^2 ，可变荷载的组合值系数取 0.7，计算跨度 l_0 取 2.00 m，试计算板的不利荷载效应设计值。