

第3章

混凝土结构设计的基本原则

教学提示：建筑结构设计原则应符合 GB 50068—2001 的规定，有关作用(荷载)及其效应组合应符合 GB 50009—2001 的规定。桥涵结构设计原则应符合 GB/T 50283—1999《公路工程结构可靠度设计统一标准》的规定，有关作用(荷载)及其效应组合应符合 JTJ D60—2004《公路桥涵设计通用规范》的规定。由于建筑结构和桥涵结构都是采用以概率论为基础的极限状态设计法，都是采用分项系数的设计表达式进行设计，两种结构设计原则总体相同。故本章主要结合 GB 50068—2001、GB 50009—2001 和《规范》GB 50010 的有关规定重点介绍了建筑混凝土结构设计的基本原则，对于桥涵混凝土结构设计的基本原则主要是介绍了其与建筑混凝土结构设计基本原则的区别之处。

学习要求：通过本章学习，学生应掌握工程结构极限状态的基本概念，包括结构上的作用与作用效应、对结构的功能要求、设计基准期、设计使用年限、结构的设计状况、两类极限状态等；了解结构可靠度的基本原理；熟悉概率极限状态设计方法；掌握实用设计表达式。

3.1 结构的功能要求和极限状态

3.1.1 结构上的作用、作用效应及结构抗力

1. 结构上的作用、作用效应

作用是指施加在结构上的力(直接作用，也称为荷载)和引起结构外加变形或约束变形的原因(间接作用)。例如结构自重、汽车荷载、人群荷载、风荷载和雪荷载等为直接作用；地基不均匀沉降、温度变化、混凝土收缩等为间接作用。

按时间的变化，结构上的作用可分为三类。

(1) 永久作用。在设计基准期内量值不随时间变化，或其变化与平均值相比可以忽略的作用，如结构自重、土压力和预应力等。

(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，如楼面活荷载、屋面活荷载、吊车荷载、风荷载和雪荷载等。

(3) 偶然作用。在设计基准期内不一定出现，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、爆炸和撞击等。

作用效应是指由作用在结构上引起的内力(如弯矩、剪力、轴力和扭矩)和变形(如挠度、裂缝和侧移)。当作用为直接作用时，其效应通常称为荷载效应，用 S 表示。

荷载和荷载效应均为随机变量或随机过程。

2. 结构抗力

结构抗力是指结构或结构构件承受作用效应的能力,用 R 表示,如构件的承载力、刚度和抗裂度等。钢筋混凝土构件抗力的大小是由构件的截面尺寸、材料性能以及钢筋的配置方式和数量决定,可由相应的计算公式求得。由于影响抗力的主要因素(几何参数、材料性能和计算模式)都具有不确定性,都是随机变量,因而由这些因素综合而成的结构抗力也是随机变量。

3. 设计基准期与设计使用年限

设计基准期是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。建筑结构的设计基准期为50年,公路桥涵结构的设计基准期为100年。设计使用年限是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,建筑结构的设计使用年限按表3-1采用。

表3-1 建筑结构的设计使用年限

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结构

设计基准期与设计使用年限既有联系,又有区别。设计基准期可根据结构设计使用年限的要求适当选定。结构的设计使用年限不等于结构的使用寿命,当结构的使用年限超过设计使用年限时,表明它的失效概率可能会增大,安全度水准可能会有所降低,但不等于结构不能使用。

3.1.2 结构的功能要求

结构设计的基本目的是:在现有的经济条件和技术水平下,寻求合理的设计方法来解决工程结构的可靠与经济这对矛盾,从而使所建造的工程结构在规定的的设计使用年限内满足GB 50068—2001规定的下述三项功能要求。

1. 安全性

在正常施工和正常使用时,能承受可能出现的各种作用;在设计规定的偶然事件(如罕遇地震)发生时及发生后,仍能保持必需的整体稳定性。

2. 适用性

在正常使用时具有良好的工作性能,如不发生影响正常使用的过大变形、过宽裂缝和过大的振幅或频率等。

3. 耐久性

在正常维护下具有足够的耐久性能。如结构材料的风化、老化和腐蚀等不超过一定的限度。

3.1.3 结构的极限状态

结构满足预定功能的要求而良好地工作，称结构为“可靠”；反之称为“失效”。区分结构“可靠”与“失效”的临界工作状态称为“极限状态”，即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。极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。

1. 承载能力极限状态

承载能力极限状态对应于结构或结构构件达到最大承载力、出现疲劳破坏或达到不适于继续承载的变形。

承载能力极限状态主要针对结构的安全性，其发生的概率应该限制得很低，且所有结构或结构构件都应进行承载能力极限状态设计。当结构或结构构件出现下列状态之一时，应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作为刚体失去平衡(如倾覆等)。

(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) 结构转变为机动体系。

(4) 结构或结构构件丧失稳定(如压屈等)。

(5) 地基丧失承载能力而破坏(如失稳等)。

2. 正常使用极限状态

正常使用极限状态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。

正常使用极限状态主要针对结构的适用性和耐久性，其发生时的危害较承载能力极限状态小，因此发生的概率可比承载能力极限状态高一些。结构构件一般先进行承载能力极限状态的设计计算，然后根据承载能力极限状态设计计算选定的截面尺寸、材料强度和配筋，按照使用要求进行正常使用极限状态的变形和裂缝宽度等的验算。当结构或结构构件出现下列状态之一时，应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) 影响正常使用的其他特定状态。

3. 结构的设计状况

结构的设计状况指代表一定时段的一组物理条件，设计应做到结构在该时段内不超越有关极限状态。建筑结构设计时，应根据结构在施工和使用中的环境条件和影响，区分下列三种设计状况。

(1) 持久状况。持久状况是指在结构使用过程中一定出现，其持续期很长的状况。持续期一般与设计使用年限为同一数量级，如使用期间房屋结构承受家具和正常人员荷载的状况、以及桥梁结构承受车辆荷载的状况等。

(2) 短暂状况。短暂状况是指在结构施工和使用过程中出现概率较大，而与设计使用年限相比，持续期很短的状况。如结构施工时承受堆料荷载的状况。

(3) 偶然状况。偶然状况是指在结构使用过程中出现概率很小，且持续期很短的状况，如结构遭受火灾、爆炸、撞击和罕遇地震等作用的状况。

对于上述三种设计状况，均应进行承载力极限状态设计，以保证结构的安全性。对于持久状况，尚应进行正常使用极限状态设计，以保证结构的适用性和耐久性。对于短暂状况，可根据需要进行正常使用极限状态设计。对于偶然状况，允许主要承重结构因遭受设计规定的偶然作用而局部破坏，但应保证结构不发生连续倒塌且保持必需的整体稳定性，应按有关专门规范设计。

同时，对于不同的设计状况，可采用相应的结构计算模型和可靠度水准进行设计。

4. 结构的功能函数和极限状态方程

结构上的各种作用、材料性能、几何参数等都具有随机性，这些因素若用基本变量 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 表示，则结构的功能函数可表示为

$$Z=g(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3-1)$$

当式(3-1)等于零时，则称其为极限状态方程，即

$$Z=g(X_1, X_2, \dots, X_n)=0 \quad (3-2)$$

当功能函数中仅有作用效应 S 和结构抗力 R 两个基本变量时，则结构的功能函数和极限状态方程分别见式(3-3)和式(3-4)。

$$Z=g(R, S)=R-S \quad (3-3)$$

$$Z=R-S=0 \quad (3-4)$$

由概率论可知，由于 R 和 S 都是随机变量，则 $Z=R-S$ 也是随机变量。由于 R 和 S 取值不同， Z 值有可能出现三种情况，如图 3.1 所示。

由图 3.1 所示或功能函数方程 [式(3-3)] 可以判别结构所处的状态。

当 $Z=R-S>0$ 时，结构处于可靠状态。

当 $Z=R-S=0$ 时，结构处于极限状态。

当 $Z=R-S<0$ 时，结构处于失效状态。

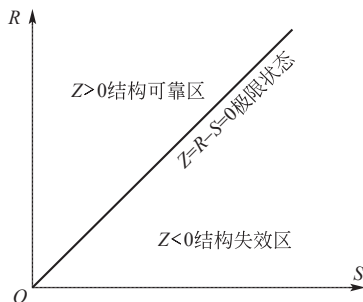


图 3.1 结构的三种状态

3.2 概率极限状态设计方法

3.2.1 结构可靠度

结构可靠度是指结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定功能的能力，是结构安全性、适用性和耐久性的总称，是完成预定功能的概率。可见，结构可靠度是结构可靠性的概率度量。

上述定义中的“规定的时间”是指“设计使用年限”，如表 3-1 所列；“规定的条件”是指“正常设计、正常施工和正常使用”，即不包括人为过失等非正常因素。

3.2.2 失效概率与可靠指标

结构能够完成预定功能的概率称为可靠概率，用 P_s 表示；结构不能完成预定功能的概率称为失效概率，用 P_f 表示。再结合功能函数 $Z=R-S$ 的概念可得

$$P_s = P(Z \geq 0) = \int_0^{+\infty} f(Z) dZ \quad (3-5)$$

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f(Z) dZ = 1 - P_s \quad (3-6)$$

式中， $f(Z)$ 为功能函数 Z 的概率密度函数，如图 3.2 所示。由于假定 R 和 S 均服从正态分布且两者为线性关系，故图 3.2 中的功能函数 $Z=R-S$ 也服从正态分布，且有

$$\mu_z = \mu_R - \mu_S \quad (3-7)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (3-8)$$

图 3.2 中的阴影部分面积表示 $Z < 0$ 时出现的概率，即失效概率 P_f 。可见，结构的可靠度可用结构的失效概率 P_f 来度量，失效概率 P_f 越小，结构可靠度越大。

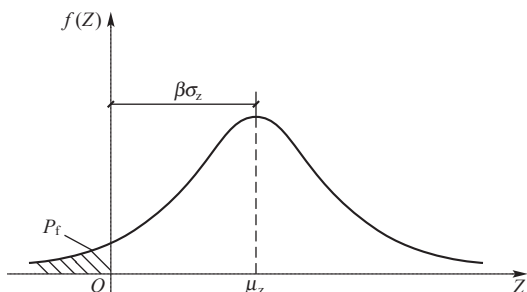


图 3.2 Z 的概率密度分布曲线

由式(3-6)可知，求解失效概率 P_f 需先求得功能函数 Z 的概率密度函数 $f(Z)$ ，再求式(3-6)的积分值。然而事实上，许多情况下根本不能求得功能函数 Z 的概率密度函数 $f(z)$ ，或虽能求得 $f(z)$ 但仍存在式(3-6)不可积或求解相当烦琐等情况。为此定义图 3.2 中的 $\mu_z = \beta\sigma_z$ ，并称 β 为可靠指标，则有

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (3-9)$$

可见，求得 R 和 S 的统计平均值 μ_R 、 μ_S 和标准差 σ_R 、 σ_S 后，即可由式(3-9)求得可靠指标 β 。同时由图 3.2 知道，可靠指标 β 与失效概率 P_f 是一一对应的，失效概率 P_f 越小，可靠指标 β 越大，两者之间的数值对应关系如表 3-2 所列。因此，结构的可靠度可用可靠指标 β 来表示。

表 3-2 可靠指标 β 与失效概率 P_f 的对应关系

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

3.2.3 目标可靠指标

当结构功能函数的失效概率 P_f 小到某一值时,人们就会因结构失效的可能性很小而不再担心,该失效概率称容许失效概率 $[P_f]$,与容许失效概率 $[P_f]$ 相对应的可靠指标称目标可靠指标,用符号 $[\beta]$ 表示。即 $P_f \leq [P_f]$ 等价于 $\beta \geq [\beta]$,表示此时结构处于可靠状态。

GB 50068—2001 根据结构的安全等级和破坏类型规定了结构构件承载能力极限状态的目标可靠指标 $[\beta]$,如表 3-3 所列。表中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的变形或其他预兆。可见,延性破坏的危害比脆性破坏的相对小些,故延性破坏的目标可靠指标 $[\beta]$ 比脆性破坏的小 0.5。

表 3-3 结构构件承载能力极限状态的目标可靠指标 $[\beta]$

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

GB 50068—2001 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,将建筑结构划分为三个安全等级,如表 3-4 所列。

表 3-4 建筑结构的的安全等级

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

对于结构构件正常使用极限状态的目标可靠指标,根据其作用效应的可逆程度宜取 0~1.5。例如某框架梁在某一荷载作用后,其挠度超过了规范的限值,卸去该荷载后,若梁的挠度小于规范的限值,则为可逆极限状态,否则为不可逆极限状态。对于可逆的正常使用极限状态,其目标可靠指标 $[\beta]$ 取为零;对于不可逆的正常使用极限状态,其目标可靠指标 $[\beta]$ 取为 1.5。当可逆程度介于可逆与不可逆之间时, $[\beta]$ 取 0~1.5,且对于可逆程度较高的结构构件宜取较低值。

3.3 荷载的代表值

实际工程结构在使用期间所承受的荷载不是一个定值,具有一定的不确定性。因此,结构设计时所取用的荷载代表值需用概率统计的方法来确定。

荷载代表值是指结构设计时用以验算极限状态所采用的荷载量值,可变荷载的代表值

有标准值、组合值、频遇值和准永久值四种，而永久荷载只有标准值。

3.3.1 荷载标准值

荷载标准值是荷载的基本代表值，是设计基准期内最大荷载统计分布的特征值(例如均值、众值、中值或某个分位值)。原则上可由设计基准期内最大荷载概率分布的某一分位值确定。

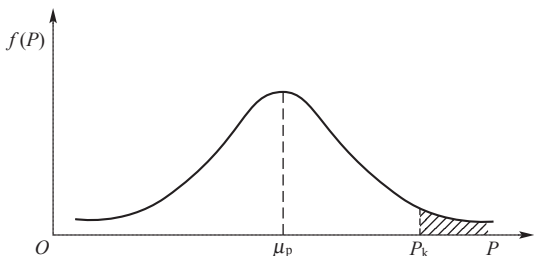


图 3.3 荷载标准值的取值方法

假定图 3.3 中的荷载 P 符合正态分布，当取分位数为 0.05 的上限分位值为荷载标准值 P_k 时，则有

$$P_k = \mu_p + 1.645\sigma_p \quad (3-10)$$

但是，迄今许多可变荷载尚未取得充分的统计资料。因此，GB 50009—2001 规定的荷载标准值实际上是根据已有的工程经验或参照传统的习用数值确定，且各荷载标准值的分位数并不统一。

永久荷载标准值，对结构自重，可按结构构件的设计尺寸与材料单位体积的自重计算确定，相当于自重的统计平均值，即分位数为 0.5。对于自重变异较大的材料和构件(如现场制作的保温材料、防水材料、混凝土薄壁构件等)，自重的标准值应根据对结构的不利状态，取 GB 50009—2001 附录 A 给出的自重上限值或下限值。

可变荷载标准值由 GB 50009—2001 给出，结构设计时可直接查用，如住宅、办公楼的楼面活荷载标准值为 2kPa，商店、车站的楼面活荷载标准值为 3.5kPa 等。

3.3.2 荷载组合值

对于可变荷载，荷载组合值是为使组合后的荷载效应在设计基准期内的超越概率，能与该荷载单独出现时的相应概率趋于一致的荷载值；或使组合后的结构具有统一规定的可靠指标的荷载值。

具体来讲，当某一可变荷载参与组合时，取该可变荷载的标准值与组合值系数 ψ_c 的乘积作为该荷载的组合值，且组合值系数 ψ_c 是一个小于 1 的折减系数。这是因为当结构上作用几个可变荷载时，各可变荷载最大值同时出现的概率很小，故乘以一个小于 1 的组合值系数 ψ_c 。例如，某商店的楼面活荷载参与组合，商店的楼面活荷载标准值为 3.5kPa，组合值系数 ψ_c 为 0.7，则该活荷载组合值为 $3.5 \times 0.7 \text{kPa} = 2.45 \text{kPa}$ 。

3.3.3 荷载频遇值

对于可变荷载，荷载频遇值是在设计基准期内，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。

具体来讲，取可变荷载的标准值与频遇值系数 ψ_f 的乘积作为荷载的频遇值，同样频遇值系数 ψ_f 是一个小于 1 的折减系数，且频遇值系数 $\psi_f \leq$ 组合值系数 ψ_c ，也就是说荷载

频遇值被超越的概率要大于荷载组合值。例如，商店的楼面活荷载标准值为 3.5kPa ，频遇值系数 ψ_f 为 0.6 ，则该活荷载频遇值为 $3.5 \times 0.6\text{kPa} = 2.10\text{kPa}$ 。

3.3.4 荷载准永久值

对于可变荷载，荷载准永久值是在设计基准期内，其超越的总时间约为设计基准期一半的荷载值。

具体来讲，取可变荷载的标准值与准永久值系数 ψ_q 的乘积作为荷载的准永久值，同样准永久值系数 ψ_q 是一个小于 1 的折减系数，且准永久值系数 $\psi_q < \text{频遇值系数 } \psi_f \leq \text{组合值系数 } \psi_c$ ，也就是说荷载准永久值被超越的概率要大于荷载频遇值和荷载组合值。例如，商店的楼面活荷载标准值为 3.5kPa ，准永久值系数 ψ_q 为 0.5 ，则该活荷载准永久值为 $3.5 \times 0.5\text{kPa} = 1.75\text{kPa}$ 。

3.4 材料强度的标准值和设计值

3.4.1 钢筋强度的标准值和设计值

1. 钢筋强度的标准值

GB 1499—1998《钢筋混凝土用热轧带肋钢筋》等国家标准规定钢材出厂前要按“废品限值”进行检验。对于有明显屈服点的热轧钢筋该废品限值相当于屈服强度平均值减去两倍标准差，即具有 97.73% 的保证率。

同时《规范》GB 50010 规定钢筋的强度标准值应具有不小于 95% 的保证率，即相当于屈服强度平均值减去 1.645 倍标准差。可见，国家标准规定的钢筋强度废品限值符合《规范》GB 50010 的要求，且偏于安全。因此，《规范》GB 50010 的钢筋强度标准值按钢筋国家标准的废品限值取值，具体如下。

(1) 对于有明显屈服点的热轧钢筋(如 HPB235 级、HRB335 级、HRB400 级、RRB400 级等)，取钢筋国家标准规定的屈服点(即屈服强度的废品限值)作为强度标准值，用符号“ f_{yk} ”表示，按附表 1-6 取值。

(2) 对于无明显屈服点的钢绞线、钢丝和热处理钢筋，取钢筋国家标准规定的极限抗拉强度 σ_b (即极限抗拉强度的废品限值)作为强度标准值，用符号“ f_{ptk} ”表示，按附表 1-8 取值。

2. 钢筋强度的设计值

为保证结构的安全性，在承载能力极限状态设计计算时，对钢筋强度取用一个比标准值小的强度值，即钢筋强度设计值，两者的关系如下。

(1) 对于有明显屈服点的热轧钢筋(如 HPB235 级、HRB335 级、HRB400 级、RRB400 级等)，其强度设计值 f_y 按式(3-11)计算，计算时钢筋材料分项系数 γ_s 取 1.1 。根据计算结果进行适当调整，最后 f_y 按附表 1-7 取值。

(2) 对于无明显屈服点的钢绞线、钢丝和热处理钢筋,其强度设计值 f_{py} 按式(3-12)计算,计算时钢筋材料分项系数 γ_s 取 1.2。根据计算结果进行适当调整,最后 f_{py} 按附表 1-9 取值。

$$f_y = f_{yk} / \gamma_s \quad (3-11)$$

$$f_{py} = 0.85 f_{ptk} / \gamma_s \quad (3-12)$$

式中 γ_s ——钢筋材料分项系数,通过多种分项系数方案比较,优选与目标可靠指标误差最小的一组方案得到。

3.4.2 混凝土强度的标准值和设计值

1. 混凝土强度的标准值

混凝土轴心抗压强度标准值和轴心抗拉强度标准值的概念见第 2 章的 2.1.1 节。在确定混凝土轴心抗压强度标准值 f_{ck} 和轴心抗拉强度标准值 f_{tk} 时,假定与立方体抗压强度具有相同的变异系数,分别按第 2 章的式(2-1)和式(2-4)计算,最后 f_{ck} 、 f_{tk} 按附表 1-1 取值。

2. 混凝土强度的设计值

为保证结构的安全性,在承载能力极限状态设计计算时,采用混凝土强度的设计值,混凝土强度设计值等于混凝土强度标准值除以混凝土材料分项系数 γ_c , 并取 $\gamma_c = 1.4$, 具体有:

轴心抗压强度设计值 f_c 为

$$f_c = f_{ck} / \gamma_c \quad (3-13)$$

轴心抗拉强度设计值 f_t 为

$$f_t = f_{tk} / \gamma_c \quad (3-14)$$

对式(3-13)和式(3-14)的计算结果进行适当调整,最后 f_c 和 f_t 按附表 1-2 取值。

3.5 实用设计表达式

用可靠指标 β 进行设计,不仅需用大量的统计数据,且计算可靠指标 β 比较复杂,所以直接采用可靠指标 β 进行设计不太现实。为此,考虑到多年的设计习惯和实用上的方便,《规范》GB 50010 采用荷载标准值、材料强度标准值以及分项系数(包括荷载分项系数、材料强度分项系数和结构重要性系数)的设计表达式进行设计,习惯上称其为“实用设计表达式”。表达式中的各个分项系数是通过可靠度分析经优选确定,起着相当于目标可靠指标 $[\beta]$ 的作用。

3.5.1 承载能力极限状态设计表达式

1. 承载能力极限状态设计表达式

GB 50010—2002 规定,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

或偶然组合,采用下列极限状态设计表达式

$$\gamma_0 S \leq R \quad (3-15)$$

$$R = R(f_c, f_s, a_k \dots) = R\left(\frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \frac{f_{sk}}{\gamma_s}, a_k \dots\right) \quad (3-16)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数,按表 3-5 取值;

S ——承载力极限状态的荷载效应组合的设计值,按式(3-17)~式(3-20)确定;

$\gamma_0 S$ ——则表示内力设计值 N (轴向拉力或轴向压力)、 M (弯矩)、 V (剪力)和 T (扭矩)等;

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;

f_{ck} 、 f_{sk} ——混凝土、钢筋的强度标准值;

γ_c 、 γ_s ——混凝土、钢筋的材料分项系数。

表 3-5 结构重要性系数 γ_0

结构的安全等级或设计使用年限	γ_0
结构的安全等级一级或设计使用年限为 100 年及以上的结构构件	≥ 1.1
结构的安全等级二级或设计使用年限为 50 年的结构构件	≥ 1.0
结构的安全等级三级或设计使用年限为 5 年的结构构件	≥ 0.9

“如何求得各类混凝土构件的承载力函数”是第 4~8 章和第 10 章需要解决的主要问题。

2. 承载力极限状态的荷载效应组合的设计值 S

《规范》GB 50010 与 GB 50009—2001 均规定,对于承载力极限状态,荷载效应组合的设计值应采用荷载效应的基本组合或偶然组合。由于本书只涉及混凝土构件的非抗震设计,故以下仅介绍荷载效应的基本组合。

GB 50009—2001 规定:对于荷载效应的基本组合,荷载效应组合的设计值应从下列组合中取最不利值确定。

(1) 由可变荷载效应控制的组合

$$S = \gamma_G S_{GK} + \gamma_{Q1} S_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{QiK} \quad (3-17)$$

(2) 由永久荷载效应控制的组合

$$S = \gamma_G S_{GK} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} S_{QiK} \quad (3-18)$$

式中 γ_G ——永久荷载的分项系数,当其效应对结构不利时式(3-17)中的 γ_G 取 1.2,式(3-18)中的 γ_G 取 1.35,当其效应对结构有利时均取 1.0;

γ_{Qi} ——第 i 个可变荷载的分项系数,其中 γ_{Q1} 为可变荷载 Q_1 的分项系数,一般情况下 γ_{Q1} 取 1.4,对于标准值大于 4kPa 的工业房屋楼面结构的活荷载 γ_{Q1} 取 1.3;

S_{GK} ——按永久荷载标准值 G_k 计算的荷载效应值;

$S_{Q_{ik}}$ ——按可变荷载标准值 Q_k 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；

ψ_{ci} ——可变荷载 Q_i 的组合值系数，按 GB 50009—2001 表 4.1.1 等的规定选用；

n ——参与组合的可变荷载数。

需要说明的有以下几点。

(1) 式(3-17)和式(3-18)仅适用于荷载与荷载效应为线性的情况。

(2) 应用式(3-17)时，若 $S_{Q_{ik}}$ 无法明显判断，则应轮次以各可变荷载效应为 $S_{Q_{ik}}$ ，最后选取其中最不利的荷载效应组合。

(3) 出于简化的目的，在应用式(3-18)时，对于可变荷载可仅考虑与结构自重方向一致的竖向荷载，而忽略影响不大的横向荷载。

(4) 通常将荷载分项系数与荷载标准值的乘积称为荷载设计值，如永久荷载设计值 $\gamma_G G_k$ 、可变荷载设计值 $\gamma_Q Q_k$ 等。其中的荷载分项系数 γ_G 、 γ_Q 与材料分项系数一样，是由规范编制人员通过多种分项系数方案比较，优选与目标可靠指标误差最小的一组方案得到。

【例 3.1】 某教室楼面简支梁如图 3.4 所示，安全等级为二级，跨度 $l=8\text{m}$ ，承受永久荷载(包括梁自重)标准值 $g_k=10\text{kN/m}$ ， $G_k=16\text{kN}$ ；承受楼面活荷载标准值 $q_k=12\text{kN/m}$ ，楼面活荷载的组合系数 $\psi_c=0.7$ ，频遇值系数 $\psi_f=0.6$ ，准永久值系数 $\psi_q=0.5$ 。求梁跨中截面 C 的荷载效应基本组合设计值 M 和支座截面 A 的荷载效应基本组合设计值 V 。

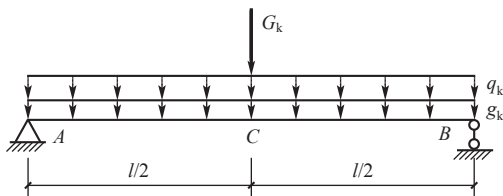


图 3.4 例 3.1 图

【解】

解题思路：荷载效应基本组合设计值应分别按式(3-17)和式(3-18)求解，然后取较大值。

(1) 求梁跨中截面 C 的荷载效应基本组合设计值 M 。

由永久荷载在跨中截面 C 产生的弯矩标准值

$$M_{Gk} = \frac{1}{8} g_k l^2 + \frac{1}{4} G_k l = 112 \text{kN} \cdot \text{m}$$

由楼面活荷载在跨中截面 C 产生的弯矩标准值

$$M_{Qk} = \frac{1}{8} q_k l^2 = 96 \text{kN} \cdot \text{m}$$

由可变荷载效应控制的弯矩设计值 M_1 按式(3-17)计算

$$M_1 = \gamma_G M_{Gk} + \gamma_{Q1} M_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} M_{QiK} = (1.2 \times 112 + 1.4 \times 96) \text{kN} \cdot \text{m} = 268.8 \text{kN} \cdot \text{m}$$

由永久荷载效应控制的弯矩设计值 M_2 按式(3-18)计算

$$M_2 = \gamma_G M_{Gk} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} M_{QiK} = (1.35 \times 112 + 1.4 \times 0.7 \times 96) \text{kN} \cdot \text{m} = 245.28 \text{kN} \cdot \text{m}$$

梁跨中截面 C 的荷载效应基本组合设计值 M 为 M_1 、 M_2 两者中的较大值，即

$$M = \max\{M_1, M_2\} = 268.8 \text{kN} \cdot \text{m}$$

(2) 求梁支座截面 A 的荷载效应基本组合设计值 V 。

由永久荷载在支座截面 A 产生的剪力标准值

$$V_{Gk} = \frac{1}{2} g_k l + \frac{1}{2} G_k = 48 \text{ kN}$$

由楼面活荷载在支座截面 A 产生的剪力标准值

$$V_{Qk} = \frac{1}{2} q_k l = 48 \text{ kN}$$

由可变荷载效应控制的剪力设计值 V_1 按式(3-17)计算

$$V_1 = \gamma_G V_{Gk} + \gamma_{Q1} V_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} V_{QiK} = (1.2 \times 48 + 1.4 \times 48) \text{ kN} = 124.8 \text{ kN}$$

由永久荷载效应控制的剪力设计值 V_2 按式(3-18)计算

$$V_2 = \gamma_G V_{Gk} + \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} \psi_{ci} V_{QiK} = (1.35 \times 48 + 1.4 \times 0.7 \times 48) \text{ kN} = 111.84 \text{ kN}$$

梁支座截面 A 的荷载效应基本组合设计值 V 为 V_1 、 V_2 两者中的较大值, 即

$$V = \max\{V_1, V_2\} = 124.8 \text{ kN}$$

为便于手算, GB 50009—2001 又规定: 对于一般排架、框架结构, 基本组合可采用简化规则, 并按下列组合值中取最不利值确定。

(1) 由可变荷载效应控制的组合

$$S = \gamma_G S_{GK} + \gamma_{Q1} S_{Q1K} \quad (3-19)$$

$$S = \gamma_G S_{GK} + 0.9 \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} S_{QiK} \quad (3-20)$$

(2) 由永久荷载效应控制的组合仍按式(3-18)计算。

3.5.2 正常使用极限状态设计表达式

1. 正常使用极限状态设计表达式

《规范》GB 50010 规定: 对于正常使用极限状态, 结构构件应分别按荷载效应的标准组合、准永久组合或标准组合并考虑长期作用影响, 采用下列极限状态设计表达式

$$S \leq C \quad (3-21)$$

式中 S ——正常使用极限状态的荷载效应组合值, 按式(3-22)和式(3-23)确定;

C ——结构构件达到正常使用要求所规定的变形、裂缝宽度和应力等的限值。

2. 正常使用极限状态的荷载效应组合值 S

(1) 对于标准组合, 荷载效应组合值 S 应按式(3-22)采用

$$S = S_{GK} + S_{Q1K} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} S_{QiK} \quad (3-22)$$

(2) 对于准永久组合, 荷载效应组合值 S 应按式(3-23)采用

$$S = S_{GK} + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} S_{QiK} \quad (3-23)$$

同样, 式(3-22)和式(3-23)也仅适用于荷载与荷载效应为线性的情况。式(3-23)中的 ψ_{qi} 为可变荷载 Q_i 的准永久值系数, 按 GB 50009—2001 表 4.1.1 等的规定选用。

需要指出的是，“正常使用极限状态的荷载效应组合值 S ”具体是指荷载作用下混凝土构件的变形、裂缝宽度和应力等。“如何计算混凝土构件的挠度与裂缝宽度”是第 9 章需要解决的主要问题。

【例 3.2】 条件同【例 3.1】。求该梁跨中截面 C 的荷载效应标准组合设计值 M_k 和荷载效应准永久组合设计值 M_q 。

【解】

解题思路：荷载效应标准组合设计值 M_k 应按式(3-22)求解，准永久组合设计值 M_q 应按式(3-23)求解。

由【例 3.1】已求得 $M_{Gk}=112\text{kN}\cdot\text{m}$ ， $M_{Qk}=96\text{kN}\cdot\text{m}$

所以，梁跨中截面 C 的荷载效应标准组合弯矩 M_k 为

$$M_k = M_{Gk} + M_{Q1k} + \sum_{i=2}^n \psi_{ci} M_{QiK} = (112+96)\text{kN}\cdot\text{m} = 208\text{kN}\cdot\text{m}$$

梁跨中截面 C 的荷载效应准永久组合弯矩 M_q 为

$$M_q = M_{Gk} + \sum_{i=1}^n \psi_{qi} M_{QiK} = (112+0.5\times 96)\text{kN}\cdot\text{m} = 160\text{kN}\cdot\text{m}$$

3. 正常使用极限状态的验算规定及其限值 C

(1) 受弯构件的最大挠度应按荷载效应的标准组合并考虑长期作用影响进行计算，其计算值不应超过附表 1-16 所规定的限值。

(2) 《规范》GB 50010 规定，混凝土结构构件正截面的裂缝控制等级分为三级，并应符合下列规定。

一级：严格要求不出现裂缝的构件。要求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。

二级：一般要求不出现裂缝的构件。要求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；按荷载效应标准永久组合计算时，构件受拉边缘混凝土不宜产生拉应力。

三级：允许出现裂缝的构件。要求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附表 1-15 规定的最大裂缝宽度限值(w_{lim})。

需要说明的是，一级、二级裂缝控制等级的验算通常称为抗裂(或抗裂度)验算，其本质是应力控制；三级裂缝控制等级的验算通常称为裂缝宽度验算，其本质是控制最大裂缝宽度。

3.6 公路桥涵工程混凝土结构设计的基本原则

《规范》JTG D62 与《规范》GB 50010 都是采用以概率论为基础的极限状态设计方法，按分项系数的设计表达式进行设计。因此，公路桥涵混凝土结构与建筑混凝土结构的设计原则及其规定基本相同，以下主要介绍两者的区别。

3.6.1 两种结构的区别及其原因

GB/T 50283—1999 规定桥涵结构的设计基准期为 100 年，而 GB 50068—2001 规定一

般建筑结构的设计基准期为 50 年。由本章 3.1.1 节设计基准期的概念可知,设计基准期是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。设计基准期的取值不同是造成桥梁结构与建筑设计基本原则有所区别的主要原因。由此引起的主要区别有以下几点。

(1) 当荷载标准值采用相同的分位值时,对于同种荷载,由于桥梁结构的设计基准期比建筑结构的长,所以桥梁工程的荷载标准值比建筑工程的取值要大。

(2) 对于相同的钢筋或混凝土的强度设计值,桥梁工程比建筑工程的取值要小。

如 C30 混凝土的轴心抗压强度设计值,桥梁结构设计时取为 13.8MPa,建筑设计设计时则取为 14.3MPa。

又如 HRB335 级钢筋的抗拉强度设计值,桥梁结构设计时取为 280MPa,建筑设计设计时则取为 300MPa。

(3) 对于安全等级相同结构的目标可靠指标,桥梁结构比建筑结构的取值要大。GB/T 50283—1999 规定桥梁结构的设计安全等级与目标可靠指标分别如表 3-6 和表 3-7 所列。

表 3-6 桥涵结构的设计安全等级

安全等级	桥涵类型	安全等级	桥涵类型
一级	特大桥、重要大桥	三级	小桥、涵洞
二级	大桥、中桥、重要小桥		

表 3-7 桥梁结构的目标可靠指标 $[\beta]$

破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	4.7	4.2	3.7
脆性破坏	5.2	4.7	4.2

比较表 3-3 与表 3-7 可知,在三个安全等级下,桥梁结构的目标可靠指标均比建筑结构的 1.0。

3.6.2 极限状态设计表达式

1. 承载能力极限状态设计表达式

《规范》JTG D62 规定,桥梁构件的承载能力极限状态计算,应采用下列表达式

$$\gamma_0 S_d \leq R \quad (3-24)$$

$$R = R(f_d, a_d) \quad (3-25)$$

式中 γ_0 ——桥梁结构的重要性系数,按公路桥涵的设计安全等级,一级、二级、三级分别取用 1.1、1.0、0.9;桥梁的抗震设计不考虑结构的重要性系数;

S_d ——作用(或荷载)效应(其中汽车荷载应计入冲击系数)的组合设计值,当进行预应力混凝土连续梁等超静定结构的承载能力极限状态计算时,式(3-24)中

的 $\gamma_0 S_d$ 应改为 $\gamma_0 S_d + \gamma_P S_P$, 其中 S_P 为预应力(扣除全部预应力损失)引起的次效应, γ_P 为预应力分项系数, 当预应力效应对结构有利时, 取 $\gamma_P = 1.0$, 对结构不利时, 取 $\gamma_P = 1.2$;

R ——构件承载力设计值;

$R(\cdot)$ ——构件承载力函数;

f_d ——材料强度设计值;

a_d ——几何参数设计值, 当无可靠数据时, 可采用几何参数标准值 a_k , 即设计文件规定值。

JTG D60—2004 规定按极限承载能力极限状态进行设计时, 应根据各自的情况选用基本组合和偶然组合的一种或两种作用效应组合。下面仅介绍荷载效应基本组合表达式。

基本组合是承载力极限状态设计时, 永久作用标准值效应和可变作用标准效应的组合, 基本表达式为

$$\gamma_0 S_d = \gamma_0 \left(\sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} S_{GiK} + \gamma_{Q1} S_{Q1K} + \psi_c \sum_{j=2}^n \gamma_{Qj} S_{QjK} \right) \quad (3-26)$$

式中 γ_0 ——桥梁结构的重要性系数, 按公路桥涵的设计安全等级, 一级、二级、三级分别取用 1.1、1.0、0.9; 桥梁的抗震设计不考虑结构的重要性系数;

γ_{Gi} ——第 i 个永久作用效应的分项系数, 按 JTG D60—2004 表 4.1.6 选用;

S_{GiK} ——第 i 个永久作用效应的标准值;

γ_{Q1} ——汽车荷载效应(含汽车冲击力、离心力)的分项系数, 取 $\gamma_{Q1} = 1.4$;

S_{Q1K} ——汽车荷载效应(含汽车冲击力、离心力)的标准值;

γ_{Qj} ——在作用效应组合中除汽车荷载效应(含汽车冲击力、离心力)、风荷载外的第 j 个可变作用效应的分项系数, 取 $\gamma_{Qj} = 1.4$, 但风荷载的分项系数 $\gamma_{Qj} = 1.1$;

S_{QjK} ——在作用效应组合中除汽车荷载效应(含汽车冲击力、离心力)外的其他第 j 个可变作用效应的标准值;

ψ_c ——在作用效应组合中除汽车荷载效应(含汽车冲击力、离心力)外的其他可变作用效应的组合系数。当永久作用与汽车荷载和人群荷载(或其他一种可变作用)组合时, 人群荷载(或其他一种可变作用)的组合系数取 $\psi_c = 0.8$, 当除汽车荷载(含汽车冲击力、离心力)外尚有二种其他可变作用参与组合时, 其组合系数取 $\psi_c = 0.7$, 尚有三种可变作用参与组合时, 其组合系数取 $\psi_c = 0.6$, 尚有四种及多于四种的可变作用参与组合时, 取 $\psi_c = 0.5$ 。

2. 正常使用极限状态设计表达式

JTG D60—2004 规定按正常使用极限状态的抗裂、裂缝宽度和挠度验算时, 应根据不同结构不同的设计要求, 选用以下一种或两种效应组合。

1) 作用短期效应组合。

作用短期效应组合是指永久作用标准值效应与可变作用频遇值效应的组合, 其效应组合表达式为

$$S_{sd} = \sum_{i=1}^m S_{GiK} + \sum_{j=1}^n \psi_{1j} S_{QjK} \quad (3-27)$$

式中 S_{sd} ——作用短期效应组合设计值;

ψ_{1j} ——第 j 个可变作用效应的频遇值系数, 汽车荷载(不计冲击力) $\psi_1=0.7$, 人群荷载 $\psi_1=1.0$, 风荷载 $\psi_1=0.75$, 温度梯度作用 $\psi_1=0.8$, 其他作用 $\psi_1=1.0$ 。

2) 作用长期效应组合

作用长期效应组合是指永久作用标准值效应与可变作用准永久值效应的组合, 其效应组合表达式为

$$S_{ld} = \sum_{i=1}^m S_{G_{iK}} + \sum_{j=1}^n \psi_{2j} S_{Q_{jK}} \quad (3-28)$$

式中 S_{ld} ——作用长期效应组合设计值;

ψ_{2j} ——第 j 个可变作用效应的准永久值系数, 汽车荷载(不计冲击力) $\psi_2=0.4$, 人群荷载 $\psi_2=0.4$, 风荷载 $\psi_2=0.75$, 温度梯度作用 $\psi_2=0.8$, 其他作用 $\psi_2=1.0$ 。

本章小结

(1) 结构设计原则就是用于工程结构设计的既安全可靠又经济合理的方法。

(2) 施加在结构上的作用可分为永久作用、可变作用和偶然作用, 作用效应是由作用引起。结构设计就是在作用效应和抗力之间寻求一种最佳的平衡。

(3) 设计基准期与设计使用年限是两个不同的概念。

(4) 结构的功能包括安全性、适用性和耐久性。结构可靠性是安全性、适用性和耐久性的总称。

(5) 结构的极限状态分为承载能力极限状态和正常使用极限状态两类。

(6) 结构的设计状况有持久状况、短暂状况和偶然状况三种。

(7) 结构可靠度是结构可靠性的概率度量。

(8) 目标可靠指标的取值与结构的安全等级、破坏类型有关, 同时桥涵结构的目标可靠指标比建筑结构的大 1.0。

(9) 荷载代表值是指结构设计时用以验算极限状态所采用的荷载量值, 有标准值、组合值、频遇值和准永久值四种。

(10) 混凝土与钢筋的材料强度指标有标准值和设计值之分。

(11) 建筑结构设计时, 荷载组合有基本组合、标准组合和准永久组合三种。

(12) 桥涵结构设计时, 荷载组合则有基本组合、短期效应组合和长期效应组合三种。

思考题

3.1 什么是结构上的作用? 按时间的变异, 作用分为哪几类? 什么是作用效应?

3.2 什么是设计基准期? 建筑结构和桥涵结构的设计基准期分别是多少?

3.3 什么是设计使用年限? 建筑结构设计使用年限是如何规定的?

3.4 结构有哪些功能要求? 结构可靠性的概念是什么? 结构可靠性与可靠度的关系如何?

3.5 什么是结构的极限状态? 承载能力极限状态与正常使用极限状态又如何定义?

各有哪些标志？

3.6 结构的设计状况有哪些？各设计状况分别应进行哪些极限状态的设计？

3.7 什么是荷载的标准值、组合值、频遇值和准永久值？根据 GB 50009—2001，对于商店的楼面活荷载，其标准值、组合值、频遇值和准永久值分别是多少？

3.8 材料强度设计值与标准值是怎样的关系？对于同种材料，其材料强度设计值为什么桥涵结构中的取值比建筑结构小？

3.9 荷载设计值与标准值是怎样的关系？

3.10 根据 GB 50009—2001，写出承载能力极限状态的设计表达式和荷载效应基本组合的表达式，说明式中各符号的含义，并指出目标可靠指标体现在哪里？

3.11 根据 GB 50009—2001，写出荷载效应标准组合和准永久组合的表达式，并说明式中各符号的含义。

3.12 根据 JTG D60—2004，写出作用效应基本组合、作用短期效应组合、作用长期效应组合的表达式，并说明式中各符号的含义。