

建筑物荷载概率设计值分析

陆 龙 文

(建 筑 工 程 系)

摘 要

本文论述建筑物荷载概率设计值分析时,对荷载采用泊松过程概率模式,并对其进行组合,提出组合系数。对概率设计的荷载取值,按建筑物荷载种类与特点、荷载相遇时间长短,赋予不同可靠指标来确定其值,使达到既符合可靠要求又经济的目的。

(一) 荷载种类与特点

建筑物上荷载的作用是直接影响建筑结构可靠度的一个主要方面。在自然界,作用在建筑物上的荷载和荷载效应,都是随时间与空间增减而变异的一种带随机性质的不确定变量,只是有的变异较小,有的变异较大。

按时间的变异大小,荷载有:

永久作用(指在建筑结构的基准使用期内变化很小的作用力),如一般的恒载,可作为常量和随机变量来处理(如图1)。

可变作用(指在建筑结构基准使用期内变动频繁且有一定变动幅度的作用力),如楼、屋面活荷载、风载、雪载和吊车荷载等,可作为随机过程来处理(如图2a持久性活载作用和图2b临时性活载作用,图3为风载作用,图4为雪载作用,图5为吊车荷载作用)。

偶然作用(指在建筑结构基准使用期内,不一定发生的作用力,但一旦发生时变化很大,作用很剧烈)。如突发性地震荷载、爆炸荷载和撞击荷载等(如图6所示)。

按空间的变异可分为固定作用力和自由作用力:

一般来说永久作用是固定作用力(即指集中、均匀或不均匀分布在结构的固定位置上的作用力),而可变作用和偶然作用是自由作用力(指可任意分布在结构上的作用力)。

按动力特性给结构的反应可分为静态作用力和动态作用力:静态作用力(指作用在结构上的力没有加速度或加速度较小可忽略的作用力,如恒载和楼、屋面持久性活载等)。动态作用力(指作用在结构上的力加速度较大,不容忽略加速度的作用力),如吊车起动、制动、地震、设备振动和风载作用等。

(二) 荷载概率模式和组合

本文于1986年12月2日收到

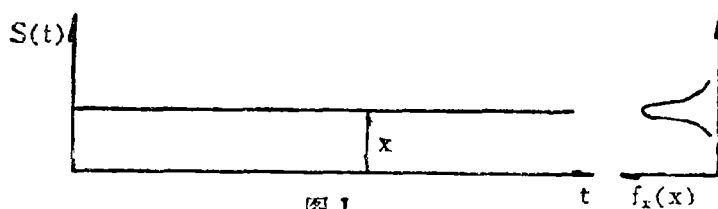


图 1

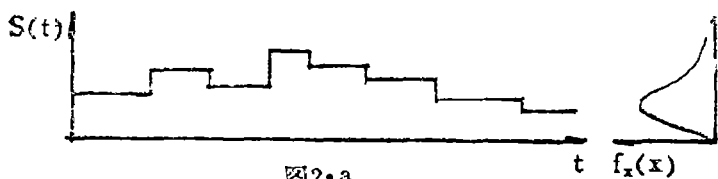


图2.a

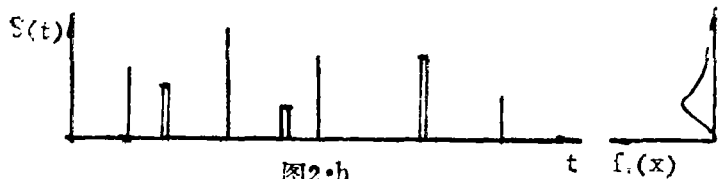


图2.b

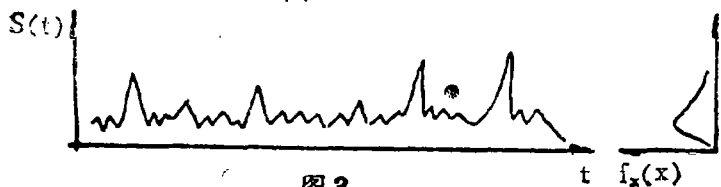


图 3

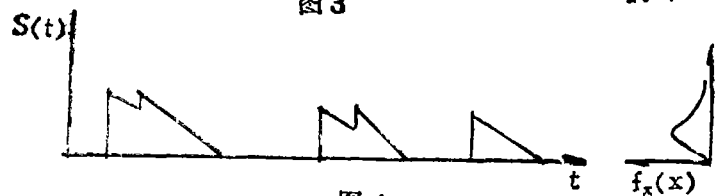


图 4

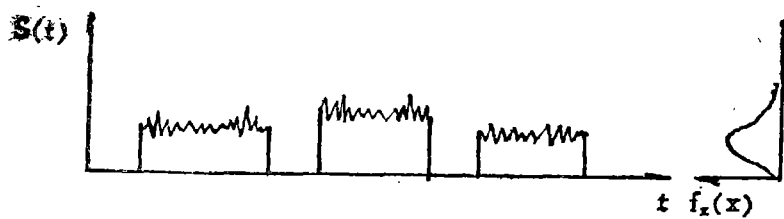


图 5

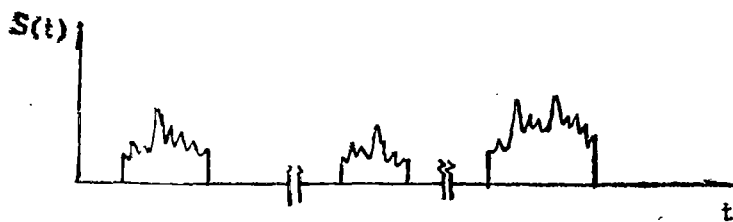


图 6

1、荷载模式

在对荷载取值时,首先要解决对荷载随机性质的描述方法。一般采用两种概率模式:一是平稳二项随机过程;一是泊松波动过程。前者是将基准使用期 T 划分为 r 个相等时段 τ ($\tau = \frac{T}{r}$),任意时点随机变量相互独立,且服从同一概率分布 $F(x)$,从而样本函数成为等间距的矩形波函数,这种模式虽简单,应用方便,但与实际荷载作用有相当差距。(如图 7 所示)。另一是泊松波动过程,它将荷载分为两类:一是基准使用期内变化比较缓慢而持续时

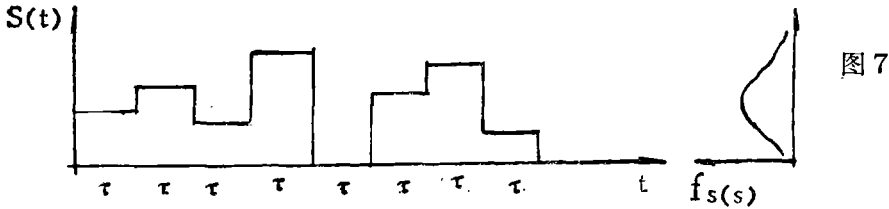


图 7

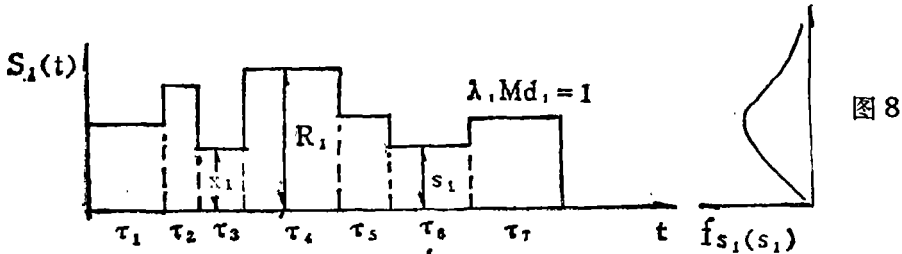


图 8

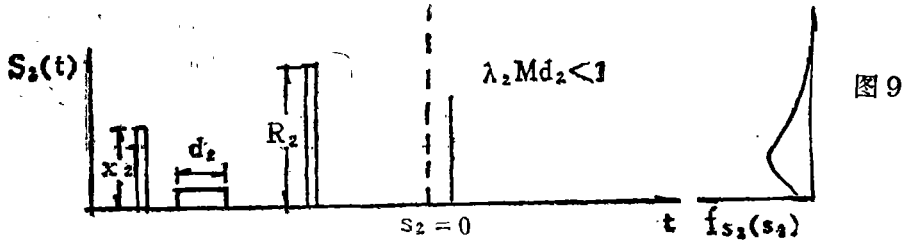


图 9

间较长的荷载用泊松方波过程作为概率模型(如图 8);另一类是变化比较急剧而持续时间较短的荷载用滤过泊松过程作为概率模型(如图 9)。泊松波动过程认为在 T 内经一次变动后,要相对持续一段时期,而变动次数 N_t 正好为 K 次的概率服从泊松分布规律,

$$P(N_t = K) = \frac{(\lambda \mu_d T)^K}{K!} e^{-\lambda \mu_d T} \quad (1)$$

式中 K —— T 内变动次数, $K = 0, 1, 2, 3, \dots$;

λ ——出现时间平均率; $\lambda \mu_d$ ——荷载平均变动率,以次/年计。

它是一个不等时段 τ 的脉冲波过程,波动持续时间长短服从指数分布。若 $\lambda \mu_d = 1$ 时,波动为矩形;若 $\mu_d \geq 0$, λ 保持一定,波动为尖波;若 $\lambda \mu_d \ll 1$, 即瞬时荷载,波动成一线,波高由独立随机变量 x 用密度函数 $f_x(x)$ 来表示。因此泊松过程完全可由 λ 、 μ_d 、 $f_x(x)$ 来表示。从而使泊松波动过程模式较广泛反应经常性荷载和临时性荷载变化的有效模式。

对基准使用期内,荷载出现的最大值 $R = \max[S(t), 0 \leq t \leq T]$ 泊松波动过程表示为:

$$F_R(r) = \exp\{-\lambda T[1 - F_x(r)]\} \quad (2)$$

若是间歇的连续过程（如地震、冲击波等），则表示为：

$$F_R(r) = \exp\{-\lambda T[1 - F_{x,m}(r)]\} \text{ ①} \dots\dots\dots (3)$$

式中： x_m ——其中出现的最大值，例如中间出现过程是稳定的间歇连续过程，则可近似地按：

$$F_{x,m}(r) = \int \exp\left\{-v\mu_d \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(r-\mu_x)^2}{\sigma_x^2}\right]\right\} f_v(y) dy \dots\dots\dots (4)$$

式中： μ_x, σ_x 和 v 是均值、均方差和出现频率系数，限制条件是波动密度 $Y = y$ 。

2、组合荷载下结构可靠度

若结构强度随时间变化忽略不计，则在基准使用期内 $[0 \leq t \leq T]$ 的结构失效概率可表示为：

$$P_f = P\{F_k[s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t), x_1, x_2, \dots, x_M]\} > 0$$

式中： $k = 1, 2, \dots, L$ ； F_k ——极值状态函数；
 $s_i(t)$ ——各种荷载和荷载作用效应（随机过程）；
 x_i ——结构强度的随机变量。

按泊松近似式： $P_f \approx 1 - \exp[-vT] \dots\dots\dots (5)$

式中 v 为平均失效率。

若考虑 F_k 限于线性函数，则在基准使用期 T 内的失效概率(L 次超过极限状态)以下式表示：

$$P_f = P(Q_L < R_m^L), \quad R_m^L = \text{Max}[R^L(t)] \quad R^L(t) = \sum_{j=1}^n cL_j s_j(t)$$

这里 $\text{Max}[R^L(t)]$ 是指在 $0 \leq t \leq T$ 的最大值； Q_L 指结构能力，强度变量的线性函数 x_i ； cL_j 指荷载的效应系数； $s_i(t)$ 指荷载过程。现在关键问题是怎样在基准使用期 T 内，求得荷载效应组合的概率分布函数，这就要解决一个荷载迭合方法问题。

3、荷载迭合方法

下面以 $L \cdot C$ 方法为例

来说明：

当各种荷载作用组合考虑时，其影响迭合部分过程的是最大荷载作用的概率起显著作用。如图10中，考虑两个独立的泊松波动过程的和， $s_1(t)$ 和 $s_2(t)$ 的组合：

在基准使用期 T 内，

$$R_1 = \text{Max}[s_1(t)]$$

$$R_2 = \text{Max}[s_2(t)]$$

而 $R_{1,2} = \text{Max}[s_{1,2}(t)]$

故 T 内组合概率分布的最大值为：

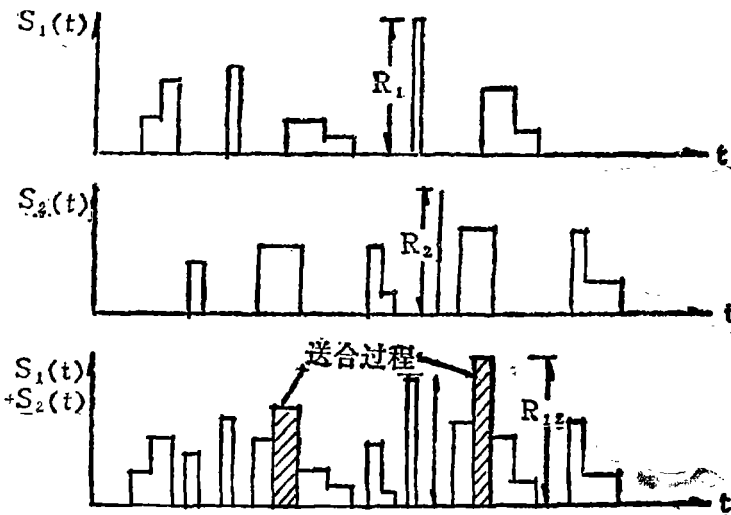


图10

① 凡下脚标后“.”符号，表示该处为下下脚标。

$$R_m^L = \text{Max}[s_1(t) + s_2(t)]$$

其组合概率分布函数按

$$F_{R_m^L}(r) = P[R_m^L \leq r] = P[(R_1 \leq r) \cap (R_2 \leq r) \cap (R_{12} \leq r)] \\ \approx P(R_1 \leq r)P(R_2 \leq r)P(R_{12} \leq r) \dots \dots \dots (6)$$

上式中前两项可由式(2)、(3)中求出, 而 R_{12} 因与 R_1 和 R_2 正相关, 迭合的过程 $S_{12}(t)$ 也是一个泊松波动过程, 其平均出现率为:

$$\lambda_{12} \approx \lambda_1 \lambda_2 (u_{d,1} + u_{d,2}) \quad (\mu_{d,i} \text{——波动期间均值})$$

$$\mu_{d,12} \approx \frac{\mu_{d,1} \cdot \mu_{d,2}}{\mu_{d,1} + \mu_{d,2}}$$

故迭合部分最大概率分布函数为:

$$F_{R,12}(r) \approx \exp\{-\lambda_{12}T[1 - F_{x,12}(r)]\}$$

这里 $F_{x,12}(r)$ 为 r 不超过给定迭合期的条件概率, 从而在基准使用期 T 内, 最大值的组合由式(6), 得

$$F_{R,m}(r) \approx \exp[-\lambda_1 T F_{x,1}^*(r) - \lambda_2 T F_{x,2}^*(r) - \lambda_{12} T F_{x,12}^*(r)] \dots (7)$$

这里 $F_x^* = 1 - F_x$

若 $\lambda_i \gg \lambda_{ij}$, 则分布是由独立荷载作用起控制。但对于较大的 r , $F_{x,ij}^*(r) \gg F_{x,i}^*(r)$ 时, 则迭合期是起控制的。

对于间歇的连续过程, 迭合分析仍按出现时间和次数为泊松波动过程模式。 $F_{x,1}^*(r)$ 和 $F_{x,2}^*(r)$ 由式(4)得出, 迭合期时间高斯过程的线性组合仍为高斯过程, 其值为:

$$F_{x,12}^*(r) \approx \int_0^\infty \int_0^\infty \left\{ 1 - \exp\left\{ -v_{12}\mu_{d,12} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{r - \mu_{x,12}}{\sigma_{x,12}}\right)^2\right]\right\} \right\} f_{v,1}(y_1) f_{v,2}(y_2) dy_1 dy_2$$

式中 v_{12} 、 $\mu_{x,12}$ 和 $\sigma_{x,12}$ 为迭合过程出现频率系数、均方值和均方差, $Y_1 = y_1$ 和 $Y_2 = y_2$ 。对多个荷载的组合作用

$$F_{R,m}(r) \approx \exp\left\{-\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i F_{x,i}^*(r) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \lambda_{ij} F_{x,ij}^*(r) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \sum_{k=j+1}^n \lambda_{ijk} F_{x,ijk}^*(r) + \dots\right]r\right\}$$

式中 λ_i ——迭合荷载 $S_i(t)$ 和 $S_j(t)$ 的平均率;

λ_{ik} ——迭合荷载 $S_i(t)$ 、 $S_j(t)$ 和 $S_k(t)$ 的平均率

$$\lambda_{ijk} \approx \lambda_i \lambda_j \lambda_k (\mu_{d,ij} \mu_{d,jk} + \mu_{d,ji} \mu_{d,jk} + \mu_{d,ij} \mu_{d,jk})$$

$F_{x,ijk}^*(r)$ 为 r 的条件概率将超过所给 $S_i(t)$ 和 $S_j(t)$ 的迭合值。

下面列出其它各种对荷载相遇的降低系数, 其取值的方法:

按LRF方法(Load Reduction Factor Method)为

$$\text{Max}[S_1(t) + S_2(t)] \approx \text{Max}[R_1, R_2, C_1(R_1 + R_2)]$$

迭合时荷载降低系数 C_1 按ANSI(American National Standard Institute)采用0.7, 0.75 或 0.8。

按CAF方法(Companion Action Factor Method)采用

$$\text{Max}[S_1(t) + S_2(t)] \approx \text{Max}[R_1 + C_2 R_2, R_2 + C_1 R_1]$$

这里 C_1 和 C_2 为作用系数, 从0.2~0.8。

按SRSS(Square Root of Sum of Squares)规则, 为

$$\text{Max}[S_1(t)+S_2(t)] \approx \sqrt{R_1^2 + R_2^2}$$

按Turkstra's Rule(TR)则为

$$\text{Max}[S_1(t)+S_2(t)] \approx \text{Max}[R_1+S_1, R_2+S_2]$$

若以两个静态作用荷载 x_1 和 x_2 为正常的方波过程,上述各种荷载组合规则的精度如图11所示。

(三) 建筑物荷载设计取值

在确定了荷载组合形式及荷载效应组合最大概率分布后,应以近似概率法对结构可靠度进行分析,并将概率分析的随机变量为函数的极限状态方程转换为实用设计表达式,并引入考虑荷载组合影响的组合系数。

1、各国规范概率设计的荷载取值

美国国家标准局(ANSI)1980年提出“以概率方法为基础的荷载准则研制报告”建议采用若干荷载组合形成并列的分项系数设计表达式,取其中最不利情况作为控制设计,而不单独给出荷载组合系数。组合形式为六种:

$$1.4D_K \text{ (恒载)}$$

$$1.2D_K + 1.6L_K \text{ (活载)}$$

$$1.2D_K + 1.6S_K \text{ (雪载)} + (0.5L_K \text{ 或 } 0.8W_K) \text{ (风载)}$$

$$1.2D_K + 1.3W_K + 0.5L_K$$

$$1.2D_K + 1.5E_K \text{ (地震荷载)} + (0.5L_K \text{ 或 } 0.2S_K)$$

$$0.9D_K - (1.3W_K + 1.5E_K)$$

这里分项系数,考虑在重力荷载情况下可靠指标为 $\beta=3$;在包括风载情况下 $\beta=2.5$;在包括地震荷载情况下 $\beta=1.75$ 。通过要求的 β 值,按已知荷载效应最大值分布 R_i 以及各分布统计特征,由结构极限状态方程,直接确定结构构件承载能力。

加拿大建筑法规除用单个荷载的分项系数外,组合荷载用组合系数 ψ 来表达如下:

$$\sqrt{[\alpha_D D_K + \psi(\alpha_L L_K + \alpha_Q Q_K + \alpha_T T_K)]}$$

D_K 、 L_K 、 Q_K 、 T_K 分别为恒载、活载、风载或地震荷载、温度变化荷载标准值;

α_D 、 α_L 、 α_Q 、 α_T 分别为恒载、活载、风载或地震荷载、温度变化荷载分项安全系数;

ψ 为建筑物重要性系数。

加拿大法规规定,在 L_K 、 Q_K 、 T_K 仅一种作用时 $\psi=1$

$$L_K, Q_K, T_K \text{ 有二种作用时 } \psi=0.7$$

$$L_K, Q_K, T_K \text{ 有三种作用时 } \psi=0.6$$

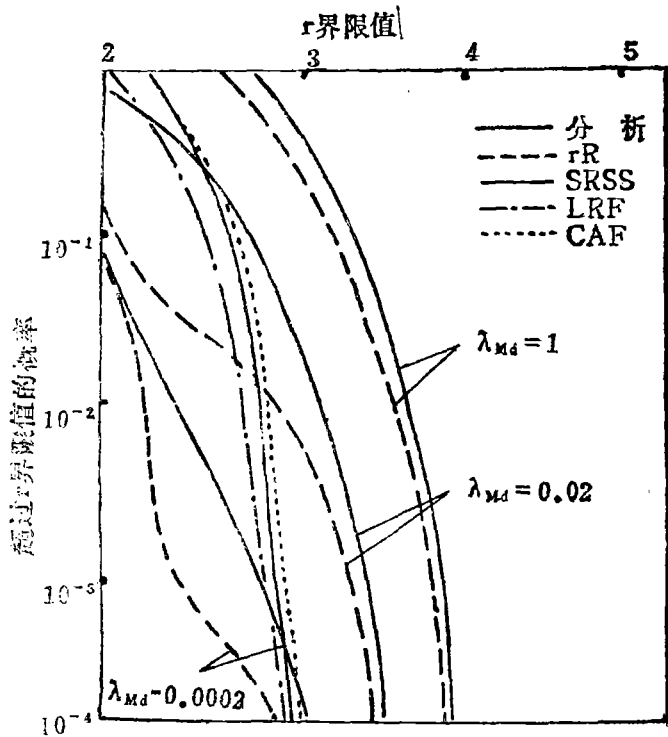


图11

结构统一标准规范国际体系 (JCSS) 采用:

$$\gamma_G G_K + \gamma_i [Q_{iK} + \sum_{i=2}^n \psi_{0i} Q_{iK}]$$

γ_G 、 γ_i ——恒载和可变荷载分项系数; Q_{iK} ——主要可变荷载;

ψ_{0i} ——组合系数, 按组合荷载性质取不同值, 在 0.4~0.6。

中国试行的“建筑结构设计统一标准”采用与 JCSS 相似, 但考虑了建筑物重要性系数 γ_0 , 即

$$\gamma_0 (\gamma_G C_G G_K + \gamma_{Q1} C_{Q1} Q_{1K} + \sum_{i=2}^n \gamma_{Qi} C_{Qi} \psi_{ci} Q_{iK})$$

γ_{Q1} 、 γ_{Qi} ——第一个和其它第 i 个可变荷载分项系数;

Q_{1K} 、 Q_{iK} ——第一个和其它第 i 个可变荷载标准值;

C_G 、 C_{Q1} 、 C_{Qi} ——为恒载, 第一个和第 i 个可变荷载的荷载效应系数;

ψ_{ci} ——第 i 个可变荷载的组合系数。

其原则是对有两种或两种以上可变荷载参与组合时, 用组合系数对荷载标准值进行折减, 使按极限状态设计表达式设计的各种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可靠指标有最佳的一致性。这里 ψ_{ci} 约为 0.6。

2、按荷载特点取值

由于作用在建筑物上的荷载, 如第一节所述, 有不同特点, 特别是作用的时间和变异大小有很大区别。考虑整个建筑结构在基准使用期内按荷载出现时间长短分别赋予不同可靠指标, 从而充分发挥当前结构体系和材料的弹塑性性质, 使达到既可靠又经济的目的。按不同荷载组合, 在建筑物基准使用期内出现的时间长短可分为三类:

(1) 建筑物经常遇到的荷载组合

建筑物经常遇到的荷载组合是指出现的时间占整个基准使用期的较大部分, 如永久荷载 (恒载) 与一种可变荷载 (活载) 或两种可变荷载 (活载 + 风载) 的荷载组合是经常遇到的, 这时应考虑长期作用对结构产生的影响, 其可靠指标 β 宜取大些, 根据“建筑结构设计统一标准”中关于结构构件承载能力极限状态可靠指标 β 来取, β 按 0.5 顺序分级如下表:

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

建筑物重要性系数即在安全等级中考虑。这种经常遇到的荷载组合有两种:

a、永久荷载与一种可变荷载组合

这时荷载组合系数 $\psi_c = 1$, 即为 $\gamma_G S_{GK} + \gamma_Q S_{QK}$

按 JCSS 方法, 设计验算点 P^* 的座标就相当于有关基本变量 (R 及 S) 的设计值, 这时极限状态方程为:

$$R^* - (S_G^* + S_Q^*) = 0, \text{ 故 } \gamma_G S_{GK} + \gamma_Q S_{Q,K} \leq \frac{R_K}{\gamma_R}$$

从而得分项安全系数为: $\gamma_G = S_G^*/S_{GK}$, $\gamma_Q = S_Q^*/S_{QK}$ 。但 S_G^* 、 S_Q^* 不仅与 β 有关, 还与荷载基本变量均值 m , 均方差 σ 有关, 而每一种构件在给定 β 值下, 荷载效应比值 $\lambda = S_Q/S_G$ 不一样, σ 值也不一样, 这就很难对分项系数取定值。但可以按优化方法, 先对分项系数取定值, 使所得实际可靠指标 $\beta_{实}$ 尽量接近给定的目标可靠指标 $\beta_{目}$, 且应该使两者 β 差值最小, 即结构构件最优的分项系数应满足使下列误差平方和 H 最小:

$$H_i = \sum_j \left(R_{kij}^* - R_{kij} \right)^2$$

式中: R_{kij}^* ——第*i*种构件在第*j*种荷载效应比值下,按 β 目所确定的抗力。

R_{kij} ——同样情况下,按所选的分项系数按 β 实所确定的抗力。

即 $R_{kij} = \gamma_{Ri} [\gamma_G (S_{Gk})_j + \gamma_Q (S_{Qk})_j]$

b、永久荷载与两种可变荷载组合

这时应考虑组合系数 ψ_c ,如恒载与活载和风载组合,当 $S_{LK} > S_{WK}$ 时为:

$$\gamma_G S_{GK} + \gamma_Q S_{LK} + \gamma_Q \psi_{cW} S_{WK} \leq \frac{R_K}{\gamma_R}$$

$$\text{即} \quad \psi_{cW} = \frac{R_K / \gamma_R - \gamma_G S_{GK} - \gamma_Q S_{LK}}{\gamma_Q S_{WK}}$$

当 $S_{WK} > S_{LK}$ 时, $\gamma_G S_{GK} + \gamma_Q S_{WK} + \gamma_Q \psi_{cL} S_{LK} \leq R_K / \gamma_R$

$$\text{即} \quad \psi_{cL} = \frac{R_K / \gamma_R - \gamma_G S_{GK} - \gamma_Q S_{WK}}{\gamma_Q S_{LK}}$$

(2) 建筑物不常遇到的荷载组合

建筑物不常遇到的荷载组合是指出现的时间占整个基准使用期的较小部分,如永久荷载与三种或三种以上可变荷载的组合(活载、风载、雪载和吊车荷载等)。这时宜取可靠指标 β 较经常遇到荷载组合小些,如下表:

破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	3.2	2.7	2.2
脆性破坏	3.7	3.2	2.7

按下式引入组合系数

$$\gamma_G S_{GK} + \psi_c \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} S_{QiK} = R_K^* / \gamma_R$$

$$\psi_c = \frac{R_K^* / \gamma_R - \gamma_G S_{GK}}{\sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} S_{QiK}}$$

$$\text{分项系数 } \gamma_G = S_{GK}^* / S_{GK}; \quad \gamma_{Qi} = \frac{S_{Qi}^*}{S_{QiK}}$$

R_K^* ——满足 β 目所计算出抗力验算点值。

上式由于随多种因素变化, ψ_c 值不同,因此需在一定荷载效应组合下,按 $\rho = \sum_i S_{iK} / S_{GK}$

及 $\xi = \frac{S_{QiK}}{S_{GK}}$ 的变化,以I值达到最小为条件,用优化方法确定最佳组合系数 ψ_c 值,I值为:

$$I = \sum_i \sum_j \left\{ 1 - \gamma_{Ri} \left[\gamma_G (S_{GK})_j + \psi_c \sum_{j=1}^n \gamma_{Qi} (S_{QiK})_j \right] / R_{kij} \right\}^2$$

(3) 建筑物偶然遇到的荷载组合

破坏类型	安全等级		
	一级	二级	三级
延性破坏	2.7	2.2	1.7
脆性破坏	3.2	2.7	2.2

建筑物偶然遇到的荷载组合是指出现的时间占整个基准使用期很短很短,或是根本不出现,属于一种突发性荷载组合,如永久荷载与可变荷载和地震荷载、爆炸荷载、冲击荷载的组合。这种情况下可靠指标 β 还可取小些,如左表:

组合时,考虑偶然荷载为 A_k ,而后按下式引入组

合系数:
$$\gamma_G S_{GK} + A_K + \psi \sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} S_{Qi:K} = \frac{R_Y^*}{\gamma_R}$$

即
$$\psi = \frac{R_K^* / \gamma_R - \gamma_G S_{GK} - A_K}{\sum_{i=1}^n \gamma_{Qi} S_{Qi:K}}$$

ψ 值按前述用优化方法确定。

最后按上述三种情况的组合, 取其最不利情况作为控制设计值。

参 考 资 料

- [1] Y. K. Wen, "Loads and Load Combination", Lecture notes, Professor of Department of Civil Engineering, University of Illinois.
- [2] Y. K. Wen, "Methods For Reliability of Structures Under Multiple Time Varying Loads, "Journal of Nuclear Engineering and Design, Vol,60,Oct, 1980.
- [3] Y. K. Wen, (Professor, M•ASCE) and H. T. Pearce (Research Assistant), "Recent Developments In Probabilistic Load Combination", Proceedings of The ASCE Symposium on Probabilistic Methods in Structure Engineering. St. Louis, Missouri, 1981.
- [4] American National Standard Institute, Building Coad. ANSI. A58. 1982.
- [5] International Standardization Organization. I. S. O. 2394. 1980.
- [6] "工程结构可靠性理论及其应用" (第二册), 铁道部科学研究院、长沙铁道学院、华东交通大学编, 1985.
- [7] "结构可靠度", 陆龙文、万小芸编, 1984.
- [8] "建筑设计统一标准" (草案), 建筑设计统一标准编委会, 1981.