

# 一个关于高柔结构顺风向抗风设计中 考虑地震作用组合的概率模型及求解\*

洪小健, 顾明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

(郭兴明推荐)

**摘要:** 基于概率方法建立了高柔结构顺风向抗风设计中, 考虑地震作用组合的总水平荷载的计算模型并进行了求解。在基于 Tuksra 准则的具体组合分析中, 考虑了风和地震作用作为离散随机过程的发生概率以及风速和地面加速度的概率分布特征, 并按照随机变量及相应函数的概率密度关系, 得到了风和地震作用的概率密度分布。后利用卷积方法, 分析探讨了结构抗风设计中地震作用的组合, 并给出了实际的高柔结构算例。该研究反映对于水平荷载由风荷载起控制作用的高柔结构, 最大水平荷载验算中, 考虑风和地震作用后组合的总荷载可能较抗震设计中考虑了风荷载组合的结果更为不利。

**关键词:** 高柔结构; 风荷载; 地震作用; 组合; Tuksra 准则

**中图分类号:** TU311.4      **文献标识码:** A

## 引 言

我国规范一般不将地震与风荷载作用同时考虑, 只有高度超过 60 m 的建筑才既要考虑地震对建筑结构的作用, 又要考虑风荷载效应。《高层建筑技术规程》<sup>[1]</sup> 指出高层结构水平抗震设计时, 风荷载参与的组合系数是 0.2。但规程本身、相关背景技术资料并没有明确风荷载组合系数取值的理论依据和计算过程。且规范中建议风荷载组合系数时, 并没有要求按结构形式、结构高度、结构动力特性的不同而采用不同组合值, 也没有说明具体取值与结构在地震作用下的响应状态(弹性或塑性)是否相关。在某些沿海地区有一定的地震设防烈度, 风荷载值也偏高, 风荷载在总作用力和其它主要的力学指标上都是占优的。在进行抗风验算时, 风与地震组合后的响应可能较地震与风组合的响应更大, 因而有必要着手对风与地震作用的组合进行研究。按照规范中荷载组合效应的定义有

$$S = \gamma_1 C_1 F_1 + \sum_{i=2}^n \phi_i \gamma_i C_i F_i, \quad (1)$$

其中  $\phi$  是参与荷载的组合系数,  $\gamma$  是荷载分项系数,  $C$  是荷载效应系数,  $F_1$  通常是主耀的验算

\* 收稿日期: 2004\_12\_05; 修订日期: 2006\_03\_14

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(50321803)

作者简介: 洪小健(1975—), 男, 江苏省兴化市人, 研究助理, 博士(E-mail: hongxiaojian@21.cn.com);

顾明(1958—), 男, 江苏省兴化市人, 教授, 博士(联系人, Tel: + 86\_21\_65981210; E-mail: minggu@mail.tongji.edu.cn)。

荷载,  $F_i (i = 2, \dots, n)$  是参与验算的组合部分。地震与风组合或风与地震组合时, 式(1)中总共只有两项, 可以分别表达为式(2)

$$\begin{cases} S_{E+W} = \gamma_E C_E F_E + \phi_W \gamma_W C_W F_W, \\ S_{W+e} = \gamma_W C_W F_W + \phi_e \gamma_e C_e F_e, \end{cases} \quad (2)$$

其中 E、W 代表地震、风荷载作用。大写代表主要验算部分, 小写代表参与组合部分按照规范的建议地震与风组合时,  $S_{E+W}$  中的  $\phi_W$  为 0.2; 而风与地震作用的概率不同, 抗风验算时, 地震荷载的组合系数可能不完全一样, 故  $S_{W+e}$  中的  $\phi_e$  能否直接使用结构抗震验算时的风荷载组合系数, 需要进行分析。本文按照概率方法, 以荷载分布为线索, 以对应于保证概率的分位数求解为关键, 以式(2)为最终表达形式, 给出了地震作用参与组合的具体计算方法。

## 1 概率建模

风荷载与地震作用的组合本质上是荷载效应极值的概率分布问题。在考虑水平荷载引起的结构整体效应时, 只有两种荷载: 地震作用与风荷载。相对而言风荷载作用频度较高。无论是风荷载还是地震荷载, 一旦发生它们各自有其不确定的持续时间和强度。

### 1.1 组合原理

通常随机荷载组合模型有 Ferry Borges<sup>[2]</sup>, Jess 组合模型, 但无论风、地震作用的发生都是随机的, 且荷载发生后, 荷载的持续时间和幅值也是完全随机的。因此采用适合静荷载及拟静荷载(即荷载作用持续时间近似恒定、作用幅值变化不大的荷载)的 Ferry Borges 模型计算风和地震作用的组合分布不是十分合适。本文组合分析方法中采用 Turkstra<sup>[3,4]</sup> 准则中的基本思想。组合基本思想如图 1 所示。考虑两条已经记录的随机过程  $X_1$  和  $X_2$ 。当验算  $X_1$  且考虑  $X_2$  参与组合时, 采用  $X_1$  在使用期限内的最大值,  $X_2$  则取在相应的某个时刻发生时的值; 当验算  $X_2$  且考虑  $X_1$  参与组合时, 采用  $X_2$  在使用期限内的最大值,  $X_1$  则取在相应的某个时刻发生时的值。实际中风和地震作用确定性的预测是不可能的, 主要验算荷载最大值发生的时刻是不能确定的(可以认为是任意某个时刻), 因此在概率意义上组合荷载在相应时刻的值等同于不确定的某个时刻可能发生作用引起的值。

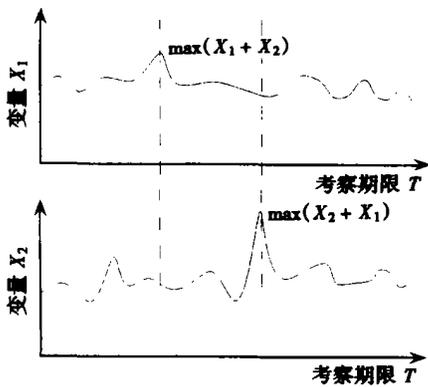


图 1 Turkstra 组合原则

### 1.2 概率组合模型

实际中风和地震作用的确定性描述是不可能的, 于是 Turkstra 组合原则的概率描述为: 当荷载组合时, 主要验算部分和组合部分看作为两个独立随机变量。对于主要验算部分而言, 变量概率分布服从使用期限设计中采用的极值概率分布, 而组合部分的变量则采用某个时刻可能发生时的分布概率, 组合实质就是随机变量的相加。在结构抗风设计中, 通常认为作用在结构上的风速服从年最大风速分布。按 Turkstra 准则, 在考虑地震参与组合时, 直接使用抗震设计时采用的地面加速度分布不合适, 因为那是 50 年内的地面加速度峰值分布, 因此需要

导出不确定的某个时刻可能发生的一次地震加速度的概率分布。由于风和地震作用组合是在结构抗风设计(顺风向)的基础上进行的, 因此在两种荷载共同作用时, 组合中风荷载的风速变

量始终服从设计分布(年最大风速分布),地震动的加速度分布则采用了可能发生的某一次地震动引起的加速度分布估算,而不直接采用结构抗震设计中的50年或者100年内的地震参数的极值分布。从高柔结构抗风验算的角度,总水平荷载分布按全概率公式表达为

$$P[F \leq f] = (1 - P')F_W + P'F_{W+e}, \quad (3)$$

其中  $F_W$  代表了风作用引起的总荷载效应的随机变量,  $F_{W+e}$  代表了风与地震直接组合的分布函数,  $P'$  是考察的结构寿命期限中的风和地震共同作用的概率。当共同作用概率为0,或者地震作用的参与对组合分布的影响微乎其微时,都可以得到水平荷载的分布就是设计风速引起的荷载分布,这反映式(3)是完备的。

### 1.3 组合假定与组合系数

如前所述须近似确定,相关震源发生地震引起的考察地区内地面加速度峰值分布。目前,对该问题的求解主要有两种思路:一种是地震学方法,基于弹性错位理论和格林函数的方法,注重震源机制和波动传播理论等物理过程的描述,该方法还处在理论探索阶段,需要解决的问题还很多。本文中避开了上述求解思路,而是依据随机过程和概率论尝试建立了地震动的数学模型,且以规范和通常研究所认可的经验关系为求解准则。组合基本假定为1)无论是风,还是地震在某一定量划分内,事件发生的概率是一个常数,与此划分在全体中位置无关。在时域中这一性质叫做平稳性,在空间中这一性质叫做均匀性。在某一年内,把风作用发生事件作为一个平稳二项过程处理。发生在考察期限内的任意时段内的风荷载作用事件中,风速最值是独立同分布随机变量。2)从地震工程学角度,应按照地震动衰减关系,将场地地震动超越概率的计算转化为震源临界震级超越概率计算。但是对所考察地区的有影响的震源具体形式(点源,线源和面源)和震源个数并不十分确定,具体场地峰值加速度随震级  $M$  和震中距  $R$  的衰减关系也不确定。对于每一个已知或潜在的震源,其与场地的相对空间关系大致稳定,且场地设防烈度确定,因此可初步设想每一个震源发生地震的概率特性满足<sup>[5]</sup>:所考察时间内,第  $i$  个震源的地震动发生事件用泊松过程描述。在任意时间区域  $[0, T]$  内,第  $i$  个地震源发生地震  $n$  次的概率为

$$P_i = \frac{(\lambda_i t)^n}{n!} e^{-\lambda_i t}, \quad (4)$$

其中  $\lambda_i$  是单位时间内地震事件发生的概率,也称作为发生强度。在概率意义上考虑风和地震作用的组合,等同于随机变量迭加。数学表达为

$$\begin{cases} (1 - P)X_W + PX_{We} = X = X_W + \phi_e X_E, \\ X_{We} = X_W + x_e, \\ \phi_e = \frac{X - X_W}{X_E}, \end{cases} \quad (5)$$

$X_W$  是风载作用引起的最大可能荷载,而  $x_e$  是某个时刻可能发生的地震引起的荷载; $X_{We}$  指的是抗风设计时,考虑地震作用组合量。 $X_E$  是按照结构抗震设计要求得到的总地震荷载,  $P$  是荷载共同发生的概率,  $\phi_e$  是设计中的组合系数。组合分布计算的卷积公式为

$$F(X_{We} \leq x) = P(X_W + x_e \leq x) = \int_0^x f(X_W) G(x - X_W) dX_W, \quad (6)$$

式中  $F$  是组合效应的分布函数,  $f$  是风载荷作用效应的概率密度函数,  $G$  是地震效应的概率分布函数。

## 2 风荷载、地震荷载的概率描述

按照结构荷载规范<sup>[6]</sup>, 风作用下的总荷载可以表达为

$$F_W = \int_0^H \beta_z u_s u_z W_0 L dz = k_1 V^2 + k_2 V^{2.333}, \quad (7)$$

其中  $\beta_z$  是风振系数,  $u_s$  是结构的体型系数,  $u_z$  是风压剖面函数,  $W_0$  是基本风压,  $L$  是结构迎风面的宽度,  $k_1, k_2$  是计算得到的与众多参数相关的系数。因为总风荷载  $F_W$  是基本风速  $V$  的单调增函数, 故风荷载概率密度函数  $f_{F_W}$  为

$$\begin{cases} f_{F_W} = \frac{f(v)}{(2k_1 V + (7/3)k_2 V^{1.333})}, \\ f(v) = a \exp(-a(v-u) - \exp(-a(v-u))), \end{cases} \quad (8)$$

其中  $f(v)$  (风速分布概率) 是按照上海龙华气象站的年最大风速记录, 结合规范建议的极值分布给出的, 按照概率密度函数与分布函数的关系可以求解风荷载的分布函数。设考察期限内, 第  $i$  个震源发生  $k$  次地震的概率为

$$P_i(N = k) = \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T}, \quad (9)$$

可认为震源  $i$  在考察期限内引起的地面加速度峰值的全概率公式为

$$\begin{aligned} P_i(A \leq a) &= \sum_{k=0}^{\infty} P_i(A \leq a | N = k) P_i(N = k) = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} P_i(A_1 \leq a, \dots, A_k \leq a) P_i(N = k). \end{aligned} \quad (10)$$

根据地震工程学经验, 在震源地震发生的次数可能不同情况下(分别发生  $k$  次或者  $l$  次,  $N = k$  和  $N = l$ , 相应地条件概率分布宜有所区别。也有研究认为, 震源  $i$  的某一次地震发生时的地面加速度分布与考察期限内地震发生的频度无关<sup>[7]</sup>, 当然那样更便于数学处理。设考察期限内, 地震发生次数分别为  $k$  次和  $l$  次, 则有

$$\begin{cases} P_i(A \leq a | N = k) P_i(N = k) = \\ P_i(A_1 \leq a) \dots P_i(A_k \leq a) P_i(N = k) = F_{ik}^k(a) \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T}, \\ P_i(A \leq a | N = l) P_i(N = l) = \\ P(A_1 \leq a) \dots P(A_l \leq a) P_i(N = l) = F_{il}^l(a) \frac{(\lambda T)^l}{l!} e^{-\lambda T}, \end{cases} \quad (11)$$

其中  $F_{ik}(a)$ ,  $F_{il}(a)$  是震源  $i$  分别发生  $k$  次和  $l$  次地震条件下, 每次地震引起的考察地区地面地震动参数分布。在考察期限内, 震源可能发生的总地震发生次数不同时, 相应的地震动参数分布宜有所区别。设在整个考察期限  $T$  内, 震源  $i$  总共分别发生 1 次、2 次、3 次,  $\dots$ ,  $k$  次地震, 引起的考察地区内, 地面地震动参数分布函数分别记作为  $F_{i1}(a)$ ,  $\dots$ ,  $F_{ik}(a)$ 。因此全概率公式为

$$\begin{aligned} P_i(A \leq a) &= \sum_{k=0}^{\infty} P_i(A \leq a | N = k) P_i(N = k) = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} P_i(A_1 \leq a, \dots, A_k \leq a) P_i(N = k) = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} F_{ik}^k(a) \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T} \begin{cases} \leq e^{-(1-\sup[F]) \lambda T}, \\ \geq e^{-(1-\inf[F]) \lambda T}, \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

记该曲线族上包络线为  $\sup[F]$ , 记其下包络线为  $\inf[F]$ , 易证明  $\sup[F]$  和  $\inf[F]$  都是关于  $a$  单调递增, 值域在  $(0, 1)$  之间, 都可以作为分布函数. 且曲线族  $F$  为

$$F: \left\{ F_{i1}(a), \dots, F_{ik}(a) \right\}, \quad (13)$$

因此震源  $i$  引起的考察地区地震动参数全概率公式满足

$$e^{-(1-\inf[F])\lambda T} \leq P_i(A \leq a) \leq e^{-(1-\sup[F])\lambda T}, \quad (14)$$

构造  $F_i$  使得下式成立

$$\begin{cases} P_i(A \leq a) e^{-(1-F_i)\lambda T} = \sum_{k=0}^{\infty} F_i^k(a) \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T}, \\ F_i = \left[ 1 + \frac{\lg P_i(a)}{\lambda T} \right], \end{cases} \quad (15)$$

因为式(15)中的概率函数是关于  $a$  的单调递增函数, 因此对于确定的  $a$  或  $P_i$ , 存在唯一确定的解  $F_i(a)$ , 结合式(14)可知其满足

$$0 \leq \inf[F] \leq F_i \leq \sup[F] < 1, \quad (16)$$

因为式(15)中的  $F_i$  是关于  $a$  的单调递增函数, 结合式(14)~(16)可知,  $F_i$  可以视为考察期限内基于全概率分布等效的, 对考察期限内不能预测的地震总发生次数不加以区分的, 调和意义上的地震动参数的等同分布, 它避免了最不利的地震动参数分布, 也不考虑对结构响应最有利的地震动参数分布, 式(16)反映它位于所有地震动分布的包络区间内. 设总共有  $n$  个震源, 所以考察期限内地面加速度峰值的全概率公式为

$$P(A \leq a) = \prod_{i=1}^n P_i(A \leq a) = \exp\left[-(1-F)\left(\sum_{k=0}^n \lambda_k\right)T\right], \quad (17)$$

式中的  $F$  满足

$$F_{a_{\min}} \leq F = \frac{\sum_{i=1}^n F_i(a) \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \leq F_{a_{\max}}, \quad (18)$$

其中  $F_{a_{\min}}$  为在  $a$  处的  $F_i (i = 1, 2, \dots, k)$  中的最小值,  $F_{a_{\max}}$  为  $F_i$  中的最大值, 易证明  $F$  自然满足单调递增的性质, 所以  $F$  为考虑场地受各个震源综合影响后, 加权平均意义上的, 某个时刻场地内发生了地震动引起的地面加速度峰值分布, 其对应的发生频度为各个震源的地震发生频度之和, 且记  $\lambda = \lambda_1 + \dots + \lambda_n$ . 由于上海地区抗震设计的地面加速度峰值  $0.35 \text{ m/s}^2$ ,  $1 \text{ m/s}^2$ ,  $2.2 \text{ m/s}^2$  的保证概率约为 37%、90%、99%, 故式(17)所表达的地面加速度概率分布, 须满足这 3 个特征加速度的概率值. 对于任意某个时刻可能发生的地震动, 其引起的地面加速度峰值采用 Weibull 分布(式(19)). 将式(19)代入到式(17)中可以整理得到地面加速度峰值的全概率分布为极值型分布, 而较长时间内地震动参数的概率描述通常采用极值型分布

$$\begin{cases} f(x) = \frac{a}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{a-1} e^{-(x/\beta)^a}, \\ F(x) = 1 - e^{-(x/\beta)^a} \quad (x \geq 0, a \geq 0, \beta \geq 0), \end{cases} \quad (19)$$

其中  $\alpha, \beta$  是参数,  $x$  是地面加速度. 按照特征加速度分布要求得到联立方程组, 求解得到

$$\begin{cases} e^{-(1-F(0.35))50\lambda} = 0.37, \\ e^{-(1-F(1.0))50\lambda} = 0.9, \\ e^{-(1-F(2.2))50\lambda} = 0.99, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lambda \approx 0.07, \\ a \approx 0.96, \\ \beta \approx 0.3, \end{cases} \quad (20)$$

可能在不确定的某个时刻发生的地震加速度峰值概率分布函数、概率密度函数如图 2 所示。

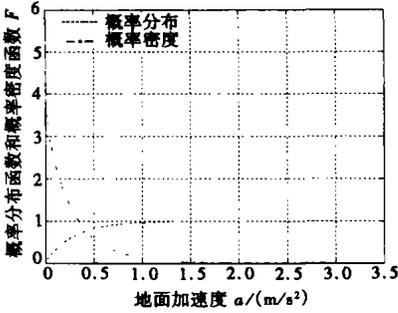


图 2 地震加速度概率分布

$$F_i = a_i g \frac{\int_0^H \phi_i dz \int_0^H \phi_i(z) m(z) dz}{\int_0^H \phi_i^2 dz}, \quad (21)$$

其中  $a_i$  是地震加速度系数, 它与地面加速度的峰值加速度相关,  $\phi_i$  是各阶振型,  $g$  是重力加速度,  $m(z)$  是沿着高度的质量分布, 总地震作用荷载为

$$F = \left( \sum_{i=1}^n F_i^2 \right)^{1/2}, \quad (22)$$

按地面加速度分布, 可求解地震荷载分布。为简化分析在整个风速分布区间, 风荷载作用下结构响应应按弹性响应计算, 且任意时刻可能发生的地面加速度主要分布区间中加速度值偏小(地面加速度峰值  $0.7 \text{ m/s}^2$  的超越概率只有 5%), 故也按弹性地震反应计算总荷载, 并对风和地震作用进行组合。

### 3 风、地震共同作用概率估算

我国结构荷载规范中定义的设计风速是 10 min 平均风速, 于是对于某一建筑, 一天内可能发生的风作用事件可以定义为“以稳定的基本风速和方向持续 10 min 作用于该建筑”, 其根据是来自于平均风的定义<sup>[8]</sup>。一天内可能发生的风荷载作用的概率分布函数  $F_D$  可近似按下式表达

$$F_D(x) = P\{W(t) \leq w, t \in 1D\} = 1 - p(1 - F'_w(w)), \quad (23)$$

其中  $F'_w(w)$  是一天内发生的最大风速分布,  $P$  是与之相应的发生概率, 结合近似平稳过程的条件,  $n$  天内风速分布的全概率公式为

$$F(w) = P_{D_1}(W(t) < w) \dots P_{D_n}(W(t) < w) = 1 - p(1 - F'_w(w))^n, \quad (24)$$

结合龙华气象站地面 10 min 的年最大风速记录资料, 和规范建议的极值分布函数, 可以得到上海地区年最大风速的超越概率为 2%, 10%, 50% 的分位值分别近似为  $30 \text{ m/s}$ ,  $25.5 \text{ m/s}$ ,  $20.9 \text{ m/s}$ , 且全概率公式必须满足特征分布概率, 联立方程组有

$$\begin{cases} 1 - F(20.9) = 0.5, \\ 1 - F(25.5) = 0.1, \\ 1 - F(30) = 0.02, \end{cases} \quad (25)$$

求解此方程组, 可得到一天内可能发生的风作用的概率为 0.25, 及相应 10 min 最大风速的近似分布函数和密度函数的参数, 相应地一天内风速分布的超越概率为 50% 的分位值为  $1.7 \text{ m/s}$ , 期望

为  $2.2 \text{ m/s}$ 。以上结果说明相对于地震作用, 风作用是比较频繁发生的, 并且在一天考察期限内, 实际可能发生的风速偏低。仍假设一天内的最大风速分布服从 Weibull 分布, 可得到其相应的参数为

$$\begin{cases} P \approx 0.25, \\ a \approx 0.975, \\ \beta \approx 3.9. \end{cases} \quad (26)$$

按照中国规范, 强风作用的持续时间取为  $10 \text{ min}$ 。对人和建筑物有影响的地震作用发生的持续时间从几秒到几十秒不等, 但规范并没有明确给出地震作用的参考持续时间。按照目前的研究水平, 地震事件和风作用事件发生的平稳性假设是个难以回避的选择。在上文分析中已经得到某一天风载作用的概率近似为  $0.25$ , 地震年发生强度参数  $\lambda$  近似为  $0.07$ 。按照地震和风作用发生事件的平稳性和均匀性假设, 可估算得到  $10 \text{ min}$  时间段内, 风作用发生的概率为  $P_{W-10 \text{ min}}$

$$1 - (1 - P_{W-10 \text{ min}})^{T/10} = 0.19, \quad (27)$$

式中的  $T$  代表一天的时间, 相应的分母  $10$  代表  $10 \text{ min}$  持续时间。 $10 \text{ min}$  时间段内地震作用发生概率为

$$P_{E-10 \text{ min}} = 1 - \frac{(X)^k}{k!} e^{-X} (k=0) = 1.33\text{E}-6, \quad (28)$$

因此规范建议风作用的持续时间取值为  $10 \text{ min}$ , 所以整个考察期限内, 风和地震共同作用的概率可以化归到  $10 \text{ min}$  区间内既发生地震又发生风作用的基本概率求解。

## 4 数值算例

某实际的超高层建筑处于 B 类地貌, 结构总高度达  $410 \text{ m}$ , 结构截面关于形心(两主轴交点)呈完全对称, 结构的单边长度尺寸为  $55 \text{ m}$ , 结构前三阶振型周期分别为  $6.2 \text{ s}$ 、 $1.65 \text{ s}$ 、 $0.72 \text{ s}$ , 结构主体沿着高度的质量分布如图 3。计算该超高层结构在百年一遇的风(速)荷载作用下, 水平承载力验算时的地震作用的组合系数, 并对不同形式的组合结果加以比较。

由风荷载作用引起的荷载概率分布和风与地震组合后总荷载概率分布如图 4。其中荷载单位为  $\text{kN}$ 。

通常抗风验算时选取年超越概率为  $1\%$  的风速作为基本风速。与抗风设计验算相一致, 计算组合系数时, 采用最终组合荷载分布中超越概率为  $1\%$  的分位数作为组合荷载的代表值。最终计算得到该结构抗风验算时, 考虑地震作用参与组合的系数为

$$\phi_e = \frac{X - X_W}{X_E} = \frac{(51.5\text{E}+3) - (45.6\text{E}+3)}{27.9\text{E}+3} = 0.21, \quad (29)$$

高层结构技术规程中规定地震荷载验算时, 风荷载组合系数为  $0.2$ 。本例计算结果与其很接近。考虑两种荷载组合的比较如表 1。

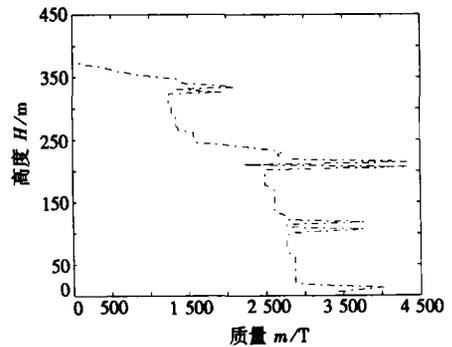


图 3 沿高度质量分布

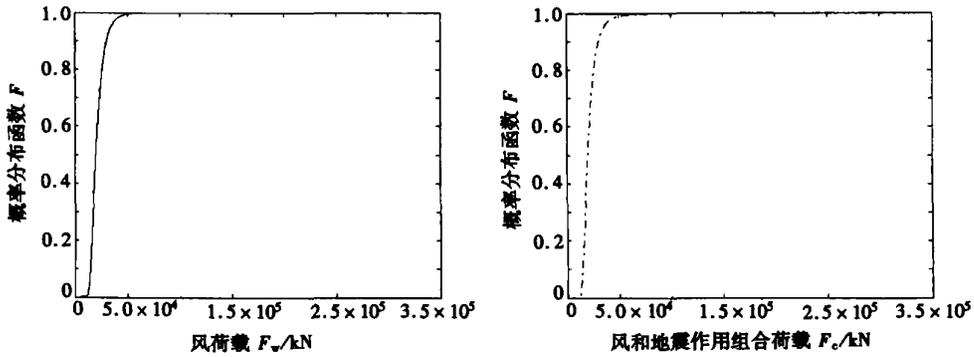


图 4 风荷载概率分布和风、地震组合后总荷载分布

表 1 不同组合的总荷载

组合类型	计算结果	相对大小
1 E+ W	E+ 0.2 × W= 4.68E+ 4 kN	100%
2 W+ e	W+ 0.2 × E= 5.30E+ 4 kN	113%
3 W+ e	W+ 0.21 × E= 5.35E+ 4 kN	115%

表 2 参数影响

地貌	组合系数	周期	组合系数
A	0.20	1.2 T	0.195
B	0.21	1.1 T	0.20
C	0.22	0.9 T	0.215
D	0.23	0.8 T	0.22

表 2 中给出了结构所处的地貌和结构自振特性改变时,地震作用组合系数的变化情况。数值算例表明地震荷载的组合系数与风作用、地震作用相对大小有关。随着参与组合的风荷载减小,地震作用的组合系数增大。但在本文算例的计算参数变动范围内,地貌、动力特性等因素对最终组合系数结果的影响不是特别的明显。表中  $T$  是实际结构的真实的基本周期。

## 5 结 语

本文基于泊松过程假设,建立地震动数学模型,以规范和通常研究认可的经验关系为求解准则,探讨了地震动参数的概率特性,在此基础上给出了高柔结构抗风设计中,考虑地震作用组合的总荷载概率分布和地震作用的组合系数,对风地震作用的组合问题作了初步的探讨和研究。分析说明本文算例中的高柔结构进行抗风验算时,严格意义上的地震作用的组合系数并非一常数。地震作用的组合系数与参与组合的风荷载、地震作用的相对大小有关,随着参与组合的风荷载相对变小,地震作用的组合系数将增大。算例中的风与地震作用组合的总荷载大于地震与风作用组合的总荷载,这说明对于主要力学指标由风载起控制作用的高柔结构,目前设计中仅仅考虑地震与风作用的组合验算可能是不全面的。

### [参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国标准. 高层建筑结构技术规程[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2001, 13—15.
- [2] Lars. Loads combination in codes[J]. Structural Safety, 1993, 13: 83—92.
- [3] Trukstra C J. Theory of structural design decision[J]. Solid Mechanics Division, 1970, 2: 127—145.
- [4] Trukstra C J. Load combination in code structural design[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1980, 2: 106—119.
- [5] 李杰, 李国强. 地震工程学导论[M]. 北京: 地震出版社, 1992, 225—226.
- [6] 中华人民共和国标准. 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2001, 28—29.
- [7] 魏琏. 建筑结构抗震设计[M]. 北京: 万国学术出版社, 1995, 95—96.

[8] 张相庭. 高层建筑抗风抗震设计计算[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997, 25—26.

## Probability Model and Solution on Earthquake Effects Combination in Along Wind Resistant Design of Tall Flexible Buildings

HONG Xiao\_jian, GU Ming

( Key Laboratory of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China )

**Abstract:** A model on the earthquake effect combination in wind resistant design of high\_rise flexible structures is proposed in accordance with the probability method. Based on the Turkstra criteria, the stochastic characters of wind velocity, earthquake ground acceleration and excitations occurrence probability were taken into account and then the combination of the earthquake effect in structure wind resistant design was analyzed with the convolution approach. The results indicate that as for the tall flexible buildings whose lateral force is governed by wind loading, the maximum lateral loads verification in terms of the wind resistant design combined with earthquake effect may be more unfavorable compared with that with respect to the earthquake resistant design involving wind effect.

**Key words:** high\_rise flexible structure; wind loading; earthquake effect; combination; Turkstra criterion