

附属体系的抗震可靠性分析

徐海燕

(建筑工程系)

摘 要

非结构构件以及建筑中的某些附属体系在地震中极易破坏。因而无论是从安全角度还是从经济观点来看,研究这一类体系在地震中的可靠性都是非常必要的。

本文通过在附属部分与主体结构之间引入耦连元件,并对这种力学模型分析得到了附属部分在滤波白噪声激励下的动力反应,在此基础上对附属部分进行了其在承载力范围内抗震动力可靠性分析。

关键词: 附属体系; 非结构; 主体结构; 抗震可靠性

引言

房屋建筑中除主体结构外还有大量的非结构构件和附属件(以下均称为附属体系)。如设备、管路系统、女儿墙、围护墙、吊顶、塔楼等等。这些部分在地震中往往较主体结构更易破坏,并且常常是造成人员伤亡和经济损失的重要原因(尤其是在基本烈度范围以内的地震情况下)。因而为保证建筑在“小震下不坏”对于这类体系进行地震作用下的动力可靠性分析是非常必要的。然而至今为止,由于种种原因,抗震可靠性的验算主要局限于主体结构。对于附属体系在这方面所做的分析工作还很少。产生这种情况的原因之一,就是两部分间在地震作用下的力学模型较难确定。本文在考虑附属体系与主体结构相互作用的情况下,在两部分间通过引入一个耦合连接弹簧,并对这种力学模型分析了附属体系的动力反应以及进行了可靠性验算。

1 附属体系的随机地震反映

在地震中,附属体系的动力反应是主体部分通过连接元件传递的。为了反应这种相互作用关系,采用如图1所示的力学模型^①。

本文于1992年元月10日收到

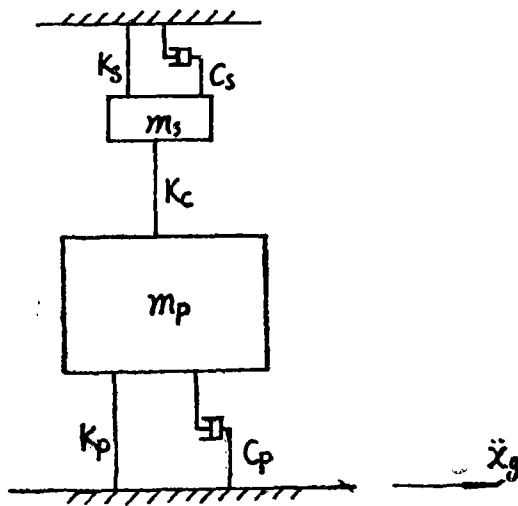


图1 力学模型

图中: K_p 、 C_p 、 m_p 分别为主体结构的刚度、阻尼系数、质量;
 K_s 、 C_s 、 m_s 分别为附属体系的刚度、阻尼系数、质量;
 K_c 为耦连作用弹簧。反映两部分间的相互作用。

$\ddot{x}_g$ 为地面水平运动加速度。

则图中系统的运动微分方程为:

$$m_p \ddot{x}_p + C_p \dot{x}_p + (K_p + K_c) x_p - K_c x_s = m_p \ddot{x}_g \quad (1)$$

$$m_s \ddot{x}_s + C_s \dot{x}_s + (K_s + K_c) x_s - K_c x_p = 0 \quad (2)$$

若设 $\ddot{x}_g$ 为高斯平稳滤波白噪声过程, 其功率谱密度为 S_0 。从 (1)、(2) 两式可求出主体结构 and 附属体系反应的均方为

$$\begin{aligned} \sigma_p^2 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{x_p}(\omega) d\omega \\ &= \frac{S_0}{2m_p^2} \left\{ \frac{K^2 [(\omega_p^2 + \Delta_p \Delta_s + \Delta_s^2) \Delta_s - \omega_s^2 (\Delta_p + 2\Delta_s)]}{K^2 (\Delta_p + \Delta_s)^2 + \Delta_p \Delta_s [(\omega_p^2 - \omega_s^2)^2 + (\Delta_p + \Delta_s)(\omega_p^2 \Delta_p + \omega_s^2 \Delta_s)]} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\omega_s^2 \Delta_s [(\omega_p^2 - 2\omega_s^2) + (\Delta_p + \Delta_s)(\omega_s^2 \Delta_p + \omega_p^2 \Delta_s)]}{K^2 (\Delta_p + \Delta_s)^2 + \Delta_p \Delta_s [(\omega_p^2 - \omega_s^2)^2 + (\Delta_p + \Delta_s)(\omega_p^2 \Delta_p + \omega_s^2 \Delta_s)]} \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_s^2 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{x_s}(\omega) d\omega \\ &= \frac{S_0}{2m_p m_s} \cdot \frac{K^2 [\omega_s^2 \Delta_s + \omega_p^2 \Delta_p + \Delta_p \Delta_s (\Delta_p + \Delta_s)]}{K^2 (\Delta_p + \Delta_s)^2 + \Delta_p \Delta_s [(\omega_p^2 - \omega_s^2)^2 + (\Delta_p + \Delta_s)(\Delta_p \omega_s^2 + \Delta_s \omega_p^2)]} \quad (4) \end{aligned}$$

以及主体结构及附属体系速度反应的均方为

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}_p^2 &= -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\dot{x}_p}(\omega) d\omega \\ &= \frac{S_0}{2m_p^2} \cdot \frac{\Delta_p \Delta_s [(\omega_p^2 - \omega_s^2)^2 + (\Delta_p + \Delta_s)(\Delta_p \omega_p^2 + \Delta_s \omega_p^2)] + K^2 (\Delta_p + \Delta_s)}{\Delta_p \Delta_s [(\omega_p^2 - \omega_s^2)^2 + (\Delta_p + \Delta_s)(\Delta_p \omega_p^2 + \Delta_s \omega_p^2)] + K^2 (\Delta_p + \Delta_s)^2}\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}_s^2 &= -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\dot{x}_s}(\omega) d\omega \\ &= \frac{S_0}{2m_p m_s} \cdot \frac{K^2 (\Delta_p + \Delta_s)}{\Delta_p \Delta_s [(\omega_p^2 - \omega_s^2)^2 + (\Delta_p + \Delta_s)(\Delta_p \omega_p^2 + \Delta_s \omega_p^2)] + K^2 (\Delta_p + \Delta_s)^2}\end{aligned}\quad (6)$$

上述式中

$$\omega_p^2 = (K_p + K_c) / m_p, \quad \omega_s^2 = (K_s + K_c) / m_s,$$

$$\Delta_p = C_p / m_p, \quad \Delta_s = C_s / m_s,$$

$$K^2 = K_c^2 / m_p m_s, \quad \text{为两部分间的耦合系数。}$$

从式(4)、(6)可见,附属体系的反应及动能均与耦合系数 k 的平方成正比。这说明主体部分与附属体系的耦合状况直接影响着附属体系的反应以及振动过程中的能量状况。当两部分的自振频率接近($\omega_p \approx \omega_s$),而耦合又较强,且阻尼比较小时,附属部分的反映将有较大的增加。因动能均值为 $E_p = \frac{1}{2} m_p \langle \dot{x}_p^2 \rangle$, $E_s = \frac{1}{2} m_s \langle \dot{x}_s^2 \rangle$ 。这里 $\langle \quad \rangle$ 表示

求均值。所以从式(5)、(6)可见,当处于上述条件时,两部分的动能均值接近相等。这种情况显然对附属体系的抗震是不利的。一般情况下 $m_p \gg m_s$,而当 $E_s/E_p \approx 1$ 时,就有

$$\frac{\langle \dot{x}_s^2 \rangle}{\langle \dot{x}_p^2 \rangle} = \frac{\dot{\sigma}_s^2}{\dot{\sigma}_p^2} \approx \frac{m_p}{m_s}$$

可见,这时附属体系的反应显然比主体结构大得较多。所以这也说明了在地震不太大的情况下,附属体系常发生破坏。

2 附属体系的抗震可靠性分析

根据前面的讨论以及大量震后调查资料,都表明附属体系在地震中往往较主体结构更易损坏。故本文将就主体结构完好的情况下讨论附属体系的可靠性分析。

考虑到“小震不坏”的设计原则,在使用期限内附属体系在地震中不坏应同时满足附属部分本身以及连接系统均完好的条件。也就是说,若其中任一部分在地震中破坏,则认为附属体系失败。因而使用期限内附属体系发生失效的概率可写为

$$P_f = \sum_j \int_0^\infty P(R_1 < S_1 \cup R_2 < S_2 | I_j, A) \cdot f(A | I_j) \cdot P(I_j) dA \quad (7)$$

式中

R_1 、 R_2 分别为耦连体系和附属体系的抗力;

S_1 、 S_2 分别为耦连体系和附属体系的反应;

$P(I_i)$ 为使用期限内 I_i 烈度地震发生的概率;

$f(A|I_i)$ 为 I_i 烈度地震水平地面加速度峰值 A 的概率密度函数。

若设附属体系和耦连部分的失效相互独立, 则(7)式可写为

$$P_f = \sum_{I_i} \int_0^{\infty} [P_1 + P_2 - P_1 P_2] f(A|I_i) P(I_i) dA \quad (7')$$

其中 $P_1 = P(R_1 < S_1 | I_i, A)$

$P_2 = P(R_2 < S_2 | I_i, A)$

为便于计算将上式写成离散形式

$$P_f = \sum_{I_i} \sum_{j, k} [P_1' + P_2' - P_1' P_2'] \cdot [F(A_{jk} | I_i) - F(A_{j, k-1} | I_i)] \cdot P(I_i) \quad (8)$$

其中 $P_1' = P_f(R_1 < S_1 | I_i, A_{jk})$

$P_2' = P_f(R_2 < S_2 | I_i, A_{jk})$

$$A_{jk}' = \frac{A_{jk} + A_{j, k-1}}{2} \quad (9)$$

A 的分布函数采用极值分布的尺度变换法。

$$F(A) = \exp[-\exp(C_1 + C_2 A + C_3 \lg A)] \quad (10)$$

参数 C_1 、 C_2 、 C_3 由最小二乘法确定。

若设反应超越界限的 λ_i 概率服从泊松假定, 则

$$P(R_i < S_i | A, T) = \exp\left[-\frac{T \dot{\sigma}_{si}}{\pi \dot{\sigma}_{si}} \exp\left(-\frac{\lambda_i^2}{2 \sigma_{si}}\right)\right] \quad (11)$$

附属体系的 σ_i 、 $\dot{\sigma}_i$ 均已在上节求出了。而连接部分因

$$X_c = X_p - X_s$$

$$\dot{X}_c = \dot{X}_p - \dot{X}_s$$

所以

$$\sigma_c^2 = \sigma_p^2 + \sigma_s^2 - \sigma_{ps}$$

$$\dot{\sigma}_c^2 = \dot{\sigma}_p^2 + \dot{\sigma}_s^2 - \dot{\sigma}_{ps} \quad (12)$$

从(1)、(2)式采用与求 σ_s 相同方法可求得

$$\begin{aligned} \sigma_{ps} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{ps}(\omega) d\omega \\ &= \frac{S_0 K_c}{2m_p^2 m_s} \cdot \frac{K^2 (\Delta_p + \Delta_s) + \omega_s^2 [\omega_s^2 \Delta_s + \omega_p^2 \Delta_p + \Delta_p \Delta_s (\Delta_p + \Delta_s)]}{K^2 (\Delta_p + \Delta_s)^2 + \Delta_p \Delta_s [(\omega_p^2 - \omega_s^2)^2 + (\omega_s^2 \Delta_p + \omega_p^2 \Delta_s) (\Delta_p + \Delta_s)]} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}_{p,1} &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S \dot{X}_p \dot{X}_s(\omega) d\omega \\ &= \frac{S_0 K_c}{2m_p^2 m_s} \cdot \frac{\Delta_s (\omega_p^2 - \omega_s^2)}{K^2 (\Delta_p + \Delta_s)^2 + \Delta_p \Delta_s [(\omega_p^2 - \omega_s^2)^2 + (\omega_s^2 \Delta_p + \omega_p^2 \Delta_s)(\Delta_p + \Delta_s)]}\end{aligned}\quad (14)$$

将以上各式代入(8)式,就可以求出在各地震烈度情况下附属体系的可靠性。由于(1)式中的界限值 λ_1 对于不同的连接及附属结构有不同的值,需根据具体问题确定。

本文根据所引入的力学模型,分析了附属体系在地震下的反应,推导了附属体系的抗震可靠性公式。

在建筑中主结构和附属部分往往都是多自由度,且为多点连接的。限于篇幅,作者将在另文中进行专门讨论。界限值 λ_1 对于不同类型的附属体系 and 不同形式的联系有不同的值,并且由于主附体系间联系的多样性, λ_1 值的确定需收集大量数据,并进行统计分析。在本文中没有加以深入讨论,而这将是今后附属体系可靠度讨论所要做的主要工作。尽管如此,笔者仍希望通过本文的讨论能为该类问题从理论上进行分析有所帮助。

参 考 文 献

- [1] M.L.Lai and T.T.Song (1990) • Statistical energy analysis of primary-Secondary structural systems. J. Engrg. Mech., ASCE 116 (10), 2400~2413
- [2] 李柱青 • 结构可靠度 • 武汉: 武汉工业大学出版社, 1989: 230~250

Seismic Reliability of Secondary Systems

Xu Haiyan

Abstract

Nonstructures and some secondary systems in building are easier damage in earthquake. So it is necessary to analyse dynamic reliability of this kind systems under earthquake excitation.

In this paper, a coupled spring has been used between primary and secondary systems. Based on this mechanical model the dynamic response of two systems that subject to filtered white-noise excitation have been got. The dynamic reliability analysis of secondary system in elastic range has been made.

Key words: secondary systems; nonstructure; primary structure; seismic reliability.