文章编号:1001-1301(2007)03-0054-04

黏性阻尼与复阻尼对钢筋混凝土框架结构地震响应影响的分析

李 鹏,王元丰
(北京交通大学 土木建筑工程学院,北京 100044)

摘要:本文讨论了利用黏性阻尼和复阻尼模型求解结构动力响应的方法;按相同的阻尼比,分别采用复阻尼模型和黏性阻尼模型计算了两个框架结构在不同地震波作用下的响应,并将结果进行对比,分析了两种不同的阻尼模型对结构动力响应的影响。结果表明,采用不同类型的阻尼对结构响应影响很大。

关键词:粘性阻尼;复阻尼;框架结构;动力响应
中图分类号: P315.966 **文献标志码**:A

Analysis of seismic responses of RC frames with viscous damping or complex damping

LI Peng, WANG Yuanfeng
(School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The methods for solving structural dynamic responses by using viscous damping and complex damping models are discussed. With equal damping ratio, complex damping model and viscous damping model are used to calculate the responses of two frame structures under various seismic ground motions separately, and the contrast of the results is made and the influence of structural dynamic responses between two different damping models is analysed. It is shown that the damping has great influence on the structural dynamic responses.

Key words: viscous damping; complex damping; frame structure; dynamic response

引言

在结构动力反应计算中,阻尼是反映结构体系振动过程中能量耗散特征的参数,是影响结构振动反应的重要因素之一[1~3]。一般情况下,在结构动力分析中,与弹性力和惯性力相比,阻尼力在数值上较小。然而,在一定条件下(如共振时),阻尼因素将起到至关重要的作用。若阻尼这一结构动力分析中的重要参数不能精确地给出,则最终求得的反应的准确度就大大降低。

在进行结构的动力反应分析时,研究者大都是采用 Rayleigh 阻尼[4,5]。在求解多自由度系统结构反应时,质量和刚度矩阵关于振型具有正交性,而 Rayleigh 阻尼可以表示为质量矩阵和刚度矩阵的线性组合,故阻尼矩阵也同样具有了正交性,使得方程组解耦,从而方便了动力计算。但这种完全因为计算解耦的需要提出的阻尼模型模糊了阻尼的物理本质,也不可能得出精确的计算结果。

而复阻尼模型是在大量固体材料实验的基础上总结出来的。与其它阻尼模型相比,它考虑了应力和振

收稿日期: 2006-10-26; **修订日期**: 2007-03-14
基金项目:铁道部科技发展基金重点项目(2004G035);交通部西部交通科技项目(2000431800058)
作者简介:李 鹏(1982-),男,硕士,主要从事结构工程抗震分析.

幅的变化对于阻尼值的影响,较符合实际材料受迫振动时能量耗散情况,因此对大多数工程材料来说,复阻尼模型能够对阻尼特性进行较好描述。

周正华等[6]建立了一种时域复阻尼本构方程,并用一维波动数值模拟实例,对比了时域复阻尼本构、频域复阻尼理论与黏性阻尼本构对计算结果的影响。王建平等[7]研究了运用复阻尼理论时应遵循的对偶原则,并进一步介绍了针对激励力无法用解析表达式写出的多自由度复阻尼振动系统,荷载的三角插值法和常数项配置对偶项的方法。朱镜清、朱敏[8,9]研究了复阻尼地震反应谱的计算方法,针对不同的阻尼比计算了不同的地震动作用下的反应谱,并与用黏性阻尼计算的反应谱做比较分析。G. D. Gounaris 等[10]采用有限法计算了复阻尼损耗因子,并指出损耗因子和结构的材料以及应力大小有关。

复阻尼作用下结构的动力响应和黏性阻尼时究竟有什么样的区别和联系是一个值得研究的问题。本文对于相等的阻尼比,分别采用黏性阻尼和复阻尼模型对结构的响应进行计算,并根据计算结果对比分析了两种不同的阻尼模型对结构反应的影响。

1　计算原理

1.1　黏弹性阻尼下结构反应的计算方法

有阻尼作用时的多自由度体系的动力方程为:

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{u} = \boldsymbol{P}(t) \tag{1}$$

假定阻尼为普通的瑞利阻尼,引入正规坐标并应用质量和刚度矩阵的正交性,可以将上面的动力方程写为:

$$M_n\ddot{Y}_n + C_n\dot{Y}_n + K_nY_n = P_n(t) \tag{2a}$$

或者:

$$\ddot{Y}_n + 2\xi_n\omega_n\dot{Y}_n + \omega_n^2Y_n = \frac{P_n(t)}{M_n} \tag{2b}$$

其中:

$$\begin{aligned} M_n &= \boldsymbol{\varphi}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\varphi}_n \\ \boldsymbol{C}_n &= \boldsymbol{\varphi}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}\boldsymbol{\varphi}_n = 2\xi_n\omega_n\boldsymbol{M} \\ \boldsymbol{K}_n &= \boldsymbol{\varphi}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\varphi}_n = \omega_n^2\boldsymbol{M}_n \\ \boldsymbol{P}_n(t) &= \boldsymbol{\varphi}_n^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}(t) \end{aligned} \tag{3}$$

式(1)~式(3)中,$\boldsymbol{M}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{K}$ 分别是系统的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵,$\boldsymbol{P}(t)$ 是作用在系统上的荷载阵列,$\boldsymbol{u}$ 是位移反应阵列;$\boldsymbol{M}_n$、$\boldsymbol{C}_n$、$\boldsymbol{K}_n$ 分别是第 n 阶振型的广义质量、广义阻尼、广义刚度,$P_n(t)$ 是第 n 阶振型的广义荷载;φ_n 是第 n 阶振型向量,ξ_n 是第 n 阶振型的阻尼比,ω_n 是第 n 阶振型的固有频率。

这样质量和刚度矩阵有非对角项耦合的 N 个联立运动微分方程就可以转换成为 N 个独立的正规坐标方程。确定动力反应时只要分别求解每一个正规坐标的反应,然后按式(4)叠加即可得出用原始坐标表示的系统总反应[11]。

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{\Phi}Y \tag{4}$$

1.2　考虑复阻尼结构反应的计算

米克力斯达德(N. O. Myklestad)提出[12]:由于材料的内摩擦而使应变的相位比应力的相位落后 ν,ν 值可近似地看作一个常数,并称之为复阻尼。

复阻尼理论应用于单自由度体系时,对于简谐振动,阻尼力与位移 y 成正比,但其相位与速度相同,即相位比位移超前 90°(或时间超前 1/4 周期),其宏观阻尼力为:

$$F_d = \mathrm{i}\nu KX \tag{5}$$

式中,ν 为复阻尼系数,也称作损耗因子;$\mathrm{i} = \sqrt{-1}$;K 是系统的刚度;X 是系统的相对位移。

根据系统在简谐荷载作用下共振时稳态振动一周所耗散的能量相等可以推得复阻尼系数和黏性阻尼比之间有 $\nu = 2\xi$ 的关系,其中 ξ 是黏性阻尼比。

由于复阻尼情形下需要对荷载进行对偶处理[7],而且要对地震动荷载进行傅里叶离散插值处理,因此其计算过程不同于黏性阻尼,考虑到平均常加速度法具有良好的积分性能,所以本文采用平均常加速度法进行结构反应的计算[13]。下面将给出采用复阻尼计算结构反应的方法。

复阻尼单自由度体系的运动方程可以写为:

$$\ddot{u} + (1 + \mathrm{i}\nu)\omega^2 u = p(t) \tag{6}$$

其中，u 是复位移反应：$u = u_1 + \mathrm{i}u_2$，$p(t) = [a(t) + \mathrm{i}b(t)]/m$，$b(t)$ 是与实际输入的 $a(t)$ 对偶的一个时间过程；ω 是系统的无阻尼固有频率。

利用逐步积分法里面的平均常加速度法来计算复阻尼情形时结构的反应，对于复加速度反应 $\ddot{u} = \ddot{u}_1 + \mathrm{i}\ddot{u}_2$，假定有：

$$\ddot{u}(t+s) = [\ddot{u}(t) + \ddot{u}(t+\Delta t)]/2 \quad (0 < s < \Delta t) \tag{7}$$

由式(7)可得：

$$\dot{u}(t+\Delta t) = \dot{u}(t) + \Delta t[\ddot{u}(t) + \ddot{u}(t+\Delta t)]/2 \tag{8}$$

$$u(t+\Delta t) = u(t) + \Delta t\dot{u}(t) + \frac{\Delta t^2}{4}[\ddot{u}(t) + \ddot{u}(t+\Delta t)] \tag{9}$$

从式(9)中解出 $\ddot{u}(t+\Delta t)$，并将其代入式(6)后，可得：

$$\left[\left(\frac{4}{\Delta t^2} + \omega^2\right) + \mathrm{i}\nu\omega^2\right]u(t+\Delta t) = p(t+\Delta t) + \ddot{u}(t) + \frac{4}{\Delta t^2}[u(t) + \Delta t\dot{u}(t)] \tag{10}$$

下面就可以求复阻尼体系运动方程(6)的实部解。令：

$$R_1 = \frac{4}{\Delta t^2} + \omega^2 \tag{11}$$

$$R_2 = \nu\omega^2 \tag{12}$$

$$A(t+\Delta t) = [a(t+\Delta t)/m] + \ddot{u}_1(t) + \frac{4}{\Delta t^2}[u_1(t) + \Delta t\dot{u}_1(t)] \tag{13}$$

$$B(t+\Delta t) = [b(t+\Delta t)/m] + \ddot{u}_2(t) + \frac{4}{\Delta t^2}[u_2(t) + \Delta t\dot{u}_2(t)] \tag{14}$$

于是，式(10)可化为：

$$\left.\begin{aligned} R_1u_1(t+\Delta t) - R_2u_2(t+\Delta t) &= A(t+\Delta t) \\ R_1u_2(t+\Delta t) + R_2u_1(t+\Delta t) &= B(t+\Delta t) \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

由方程组(15)可解得：

$$u_1(t+\Delta t) = \frac{R_1A(t+\Delta t) + R_2B(t+\Delta t)}{R_1^2 + R_2^2} \tag{16}$$

$$u_2(t+\Delta t) = \frac{R_1B(t+\Delta t) - R_2A(t+\Delta t)}{R_1^2 + R_2^2} \tag{17}$$

从这两个式子可以清楚地看到，实部解(即实际位移反应)和虚部解是耦联的。进一步可得加速度、速度表达式为：

$$\ddot{u}_1(t+\Delta t) = -\ddot{u}_1(t) + \frac{4}{\Delta t^2}[u_1(t+\Delta t) - u_1(t) - \Delta t\dot{u}_1(t)] \tag{18}$$

$$\ddot{u}_2(t+\Delta t) = -\ddot{u}_2(t) + \frac{4}{\Delta t^2}[u_2(t+\Delta t) - u_2(t) - \Delta t\dot{u}_2(t)] \tag{19}$$

$$\dot{u}_1(t+\Delta t) = \dot{u}_1(t) + \frac{\Delta t}{2}[\ddot{u}_1(t) + \ddot{u}_1(t+\Delta t)] \tag{20}$$

$$\dot{u}_2(t+\Delta t) = \dot{u}_2(t) + \frac{\Delta t}{2}[\ddot{u}_2(t) + \ddot{u}_2(t+\Delta t)] \tag{21}$$

再以 $t + \Delta t$ 的反应为已知量进而可以进行下一步反应的计算，直至 $t = T$ 时刻终止，这样便可得到动力响应的全过程。

2 算例与结果分析

(1)某三层钢筋混凝土框架结构，第一层到第三层质量 m 分别为 2 762 kg，2 760 kg，2 300 kg，刚度 k 分别为 2.485×10^5 N/m，1.921×10^5 N/m，1.522×10^5 N/m。阻尼比取 $\nu = 2\xi = 0.1$，地震动采用 EI Centro 波，采样周期为 0.02s，历时 8s。利用逐步积分法里面的平均常加速度法求解结构的反应。

对于两种不同的阻尼模型,结构顶层的位移和加速度反应计算结果如图 1,图 2 所示。

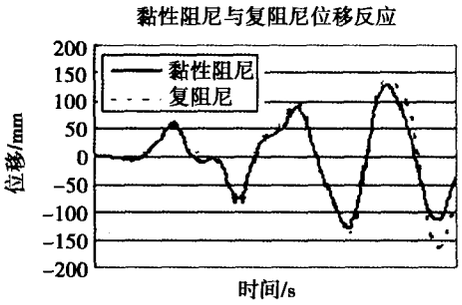

图 1　结构顶层位移反应计算结果比较

Fig. 1　The comparison of calculated results of top displacements

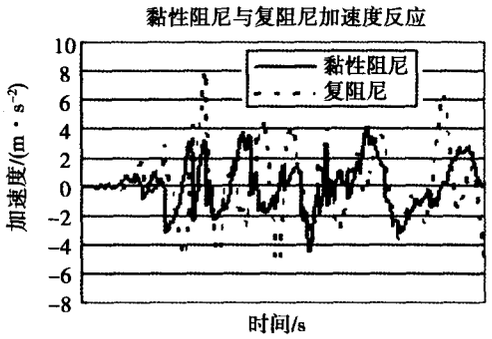

图 2　结构顶层加速度反应计算结果比较

Fig. 2　The comparison of calculated results of top accelerations

通过计算分析发现,对于两种不同的阻尼体系,当阻尼比相同时,采用复阻尼模型计算的顶层位移反应的幅值是 165.6mm,加速度反应的幅值是 8.06 m/s^2;而采用黏性阻尼计算的顶层位移反应的幅值是 127.9mm,加速度反应的幅值是 4.48m/s^2。采用复阻尼模型比采用黏性阻尼模型计算的最大位移反应幅值大了 29.5%,最大加速度反应幅值则大了 80.0%。

表 1　计算结果对比

Table 1　The comparison of calculated results

		El Centro	Northridge	Taft
顶层最大位移/mm	黏性阻尼	47.66	61.94	30.93
	复阻尼	58.03	89.97	34.06
	两者之差	21.76%	45.25%	10.12%
顶层最大加速度/($m \cdot s^{-2}$)	黏性阻尼	1.34	1.58	1.23
	复阻尼	2.12	1.86	1.94
	两者之差	58.21%	17.72%	57.72%

(2)某地区抗震设防烈度为 7 度,对于一实际的 4 层钢筋混凝土框架,第一层到第 4 层质量 m 分别为 3 038 kg,2 682 kg,2 682 kg,2 480 kg,刚度 k 分别为 2.785×10^5N/m,2.102×10^5N/m,2.102×10^5N/m,1.618×10^5N/m。阻尼比取 $\nu = 2\xi = 0.1$,分别输入 0.1g El Centro 波,Northridge 波和 Taft 波,采样周期为 0.02s,历时 8s。对于两种不同的阻尼模型,结构顶层的位移和加速度反应计算结果对比如表 1 所示。

从以上两个算例计算结果比较可知,对于不同的地震动输入,不同的结构体系,采用复阻尼模型和黏性阻尼模型计算的位移和加速度最大幅值的差别是不同的,但采用复阻尼计算结构响应时,位移和加速度反应最大幅值都比相应的黏性阻尼时大,从设计角度来讲,采用复阻尼计算结构动力反应是偏于安全的。

3　结语

本文基于黏性阻尼和复阻尼两种不同的阻尼模型计算框架结构在地震动作用下的反应。结果表明对于相等的阻尼比二者不同,复阻尼模型下框架结构的位移反应要大于黏性阻尼时的位移反应,对于加速度反应,有相同的结论。从设计角度来讲,采用复阻尼计算结构动力反应是偏于安全的。

参考文献:

[1]　Zbigniew Osinski. Damping of vibrations[M]. Netherlands: A. A. Balkema, 1998.

[2]　Beards C F, et al. Structural vibration: analysis and damping [M]. Great Britain: Arnold, 1996.

[3]　Ahid D. Nashif et al. Vibration damping [M]. New York: John Wiley & Sons, 1985.

[4]　刘传文,徐升桥. 丫髻沙大桥主桥的地震反应[J]. 铁道标准设计,2000,20(12):8 -11.

[5]　郑家树,金邦元. 大跨度钢管混凝土拱桥空间地震反应分析[J]. 西南交通大学学报,2003,38(1):53 -56.

[6]　周正华,廖振鹏,丁海平. 一种时域复阻尼本构方程[J]. 地震工程与工程振动,1999, 19(2) :37 -44.

[7]　王建平,刘宏昭,原大宁,张忠明. 含复阻尼振动系统的对偶原则及其数值方法研究[J]. 振动工程学报,2004,17(1):62 -65.

[8]　朱镜清,朱 敏. 复阻尼地震反应谱的计算方法及其它[J]. 地震工程与工程振动,2000, 20(2):19 -23.

[9]　朱 敏,朱镜清. 复阻尼地震反应谱计算的再研究[J]. 地震工程与工程振动,2001, 21(2):36 -40.

[10]　Gounaris G D, Anifantis N K. Structural damping determination by finite element approach[J]. Computers and Structures, 1999, 73 :445 -452.

[11]　克拉夫 R W,彭津 J. 结构动力学[M]. 王光远,等译. 北京:科学出版社,1985.

[12]　Myklestad N O. The concept of complex damping[J]. Journal of Applied Mechanics, 1952, 19(3):20 -30.

[13]　朱镜清. 结构抗震分析原理[M]. 北京:地震出版社,2002.