

文章编号:1671-2579(2012)01-0137-03

# 位移相关粘滞阻尼单自由度系统的动力反应

李晓莉<sup>1</sup>, 张蓓<sup>2</sup>, 孙治国<sup>1</sup>, 王东升<sup>1</sup>

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 中国科学院植物研究所)

**摘要:** 阻尼表征结构振动中的能量耗散, 在工程上通常采用阻尼比为常数的粘滞阻尼模型描述, 而大量结构动力实测表明阻尼比与位移反应幅值具有很强的相关性。该文建立了位移相关粘滞阻尼模型, 定义为体系初始阻尼比与当前时刻最大位移对应阻尼比的线性组合, 是一种时变阻尼。就单自由度系统地震反应进行了数值分析, 表明在阻尼比取为位移相关粘滞阻尼比平台值的条件下, 常阻尼比的粘滞阻尼单自由度系统与位移相关粘滞阻尼单自由度系统的地震反应基本相同。

**关键词:** 阻尼; 位移相关; 单自由度系统; 地震反应

在动力分析中用阻尼表征结构的振动能量耗散。阻尼产生的物理机制复杂, 涉及材料的内摩擦、结构的节点及不同体系部分之间的摩擦等, 在工程上通常用(等效)粘滞阻尼理论描述, 即假定阻尼力大小与相对运动速度成正比, 阻尼系数或阻尼比为常数。而现有结构动力实测结果表明, 阻尼较强烈地依赖于体系的振幅。如日本 Satake 等人通过 137 栋钢框架高层结构和 68 栋钢筋混凝土高层结构的实测数据, 分别给出了各自阻尼比  $\xi$  与频率、位移幅值的统计公式:

$$\xi = 0.013f + 400 \left( \frac{x}{H} \right) + 0.0029$$

$$\xi = 0.014f + 470 \left( \frac{x}{H} \right) - 0.0018$$

式中:  $f$  为体系基频;  $x$  为结构顶部的振幅;  $H$  为结构总高度。再考虑减隔震结构, 在地震激励下随着振幅增长, 附加耗能装置逐渐进入工作状态, 体系的阻尼也将显著增加。最后考虑钢筋混凝土结构(如桥墩)地震反应进入非线性状态, 其体系阻尼也随着反应位移幅值的增大而增加。由此该文建立了与位移相关的粘滞阻尼模型, 并就单自由度系统地震反应情况进行分析。

## 1 位移相关粘滞阻尼模型

位移相关粘滞阻尼是指阻尼力大小与相对速度成比例, 与通常粘滞阻尼理论不同的是阻尼系数与系统的反应位移相关, 具体为:

$$f_D = c(\bar{x})\dot{x} \quad (1)$$

式中:  $f_D$  为系统阻尼力;  $c(\bar{x})$  为阻尼系数;  $\dot{x}$  为系统相对速度;  $\bar{x}$  为归一化反应位移, 是时间  $t$  的函数。

借鉴粘滞阻尼理论, 定义阻尼比  $\xi(x, t)$  满足下式:

$$\xi(x, t) = \xi_{\min} + (\xi_{\max} - \xi_{\min}) \left( \frac{x_{\max, t}}{x_{\max}} \right) \quad (2)$$

式中:  $\xi(x, t)$  为与位移幅值及时间过程相关的系统阻尼比;  $\xi_{\min}$  为与位移幅值无关的系统初始阻尼比;  $\xi_{\max}$  为对应系统最大位移幅值  $x_{\max}$  的阻尼比;  $x_{\max, t}$  为当前时刻  $t$  系统经历的最大位移反应。

从式(2)可以看出该文定义的与位移相关的粘滞阻尼模型依赖于位移反应历史, 是时变的。

## 2 单自由度系统地震反应

### 2.1 单自由度系统运动方程

如图 1 所示位移相关粘滞阻尼单自由度系统在基底地震输入下的运动方程为:

$$m\ddot{x}(t) + c(x, t)\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad (3)$$

式中:  $m$  为质量系数;  $k$  为刚度系数;  $c(x, t)$  为系统与位移相关的阻尼系数;  $\ddot{x}_g(t)$  为输入地震波。

引入阻尼比  $\xi(x, t)$ , 式(3)变为:

$$\ddot{x} + 2\xi(x, t)\omega\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

式中:  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , 为系统自振圆频率。

收稿日期: 2011-08-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 50878033); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(编号: 2011QN046)

作者简介: 李晓莉, 女, 博士, 讲师。E-mail: Janet\_hs2008@yahoo.cn

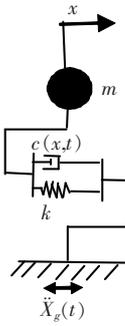


图 1 单自由度系统

### 2.2 单自由度系统地震反应分析

由式(1)、(2)定义的位移相关粘滞阻尼模型可知式(4)为非线性方程,需要数值求解。分析中假定  $\xi_{\min} = 0.02, \xi_{\max} = 0.20$ , 保证仍为小阻尼系统;对  $x_{\max}$  参数采用试算法确定,即加速度峰值为  $1.0g$  时,依式(2)计算的  $\xi(x,t)$  最大值控制在  $10\%$  左右。

#### 2.2.1 谐波地震荷载输入下的共振反应

首先研究了体系在谐波地震荷载输入下的共振反应。取单自由度系统圆频率  $\omega = 10.46 \text{ rad/s}$  (周期  $T = 0.6 \text{ s}$ ), 输入地震波为  $\ddot{x}_g(t) = A_m \sin(10.46t), A_m = 0.4g$ 。

系统阻尼比变化情况和位移时程分别见图 2、3。可以看出当振动持续时间约为 2 个周期时,系统位移反应达到最大,阻尼比也从最初的  $0.02$  达到  $0.20$ ,此后保持不变,进入到平台段。图 3 还给出了阻尼比恒为  $0.20$  (对应图 2 时变阻尼的平台值)时系统的位移反应,与位移相关阻尼系统比较二者差距不大,仅是最初时刻因前者阻尼比较大,反应略小(不超  $10\%$ )。

#### 2.2.2 地震波输入下的反应

选择常用的 El Centro 波作为输入,加速度峰值调整至  $0.4g$ 。单自由度系统周期选择  $0.4、0.8$  和  $1.6$

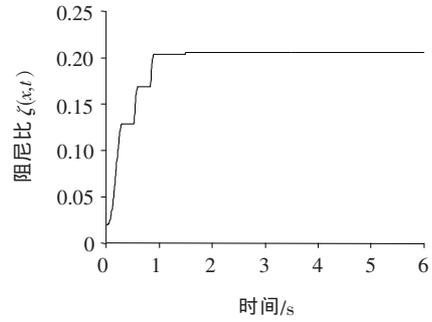


图 2 系统阻尼比  $\zeta(x,t)$  变化

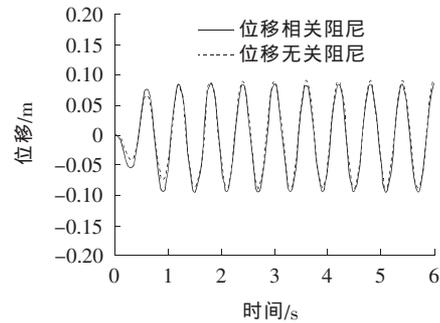
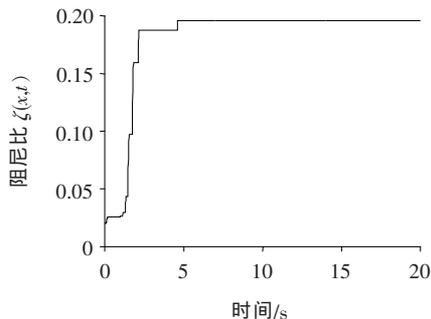


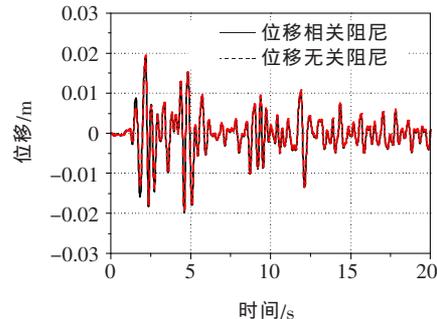
图 3 系统位移反应时程

s, 分别代表中短周期结构、中长周期结构和长周期结构。图 4~6 分别给出了它们的阻尼比变化情况和位移反应时程。图中同样给出了阻尼比为常数时对应的单自由度系统位移反应,阻尼比取为各自左图中的平台值(最大阻尼比)。

可以看出,不同周期结构的反应规律与前面简谐波荷载输入相同:1) 在最初的几秒内结构反应达到最大位移幅值,此时体系位移相关粘滞阻尼比  $\xi(x,t)$  也达到最大并保持不变;2) 位移相关粘滞阻尼单自由度系统与其对应的常阻尼比粘滞阻尼单自由度系统的地震反应基本相同,条件是后者阻尼比取为前者阻尼比

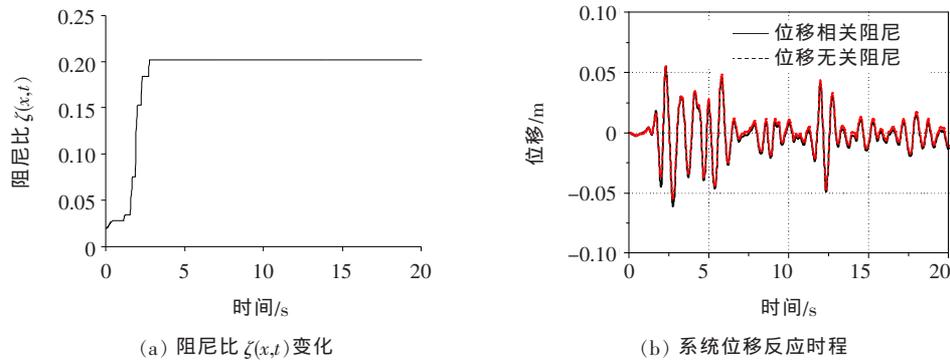
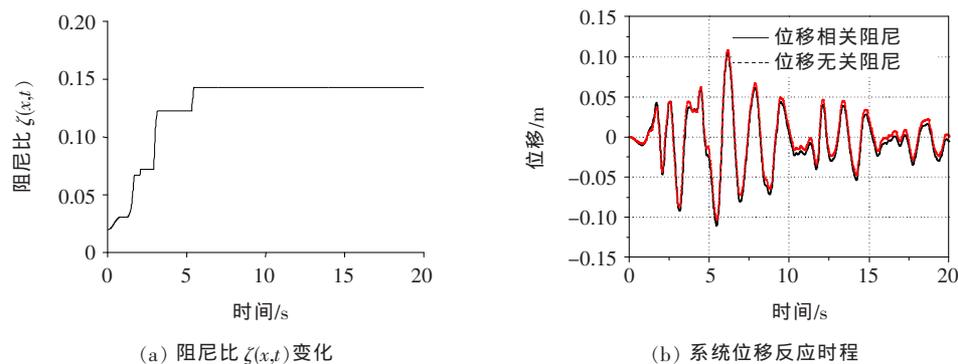


(a) 阻尼比  $\zeta(x,t)$  变化



(b) 系统位移反应时程

图 4 系统阻尼比和位移时程( $T=0.4 \text{ s}$ )

图 5 系统阻尼比和位移时程( $T=0.8\text{ s}$ )图 6 系统阻尼比和位移时程( $T=1.6\text{ s}$ )

的平台值。

### 3 结语

结构动力实测表明阻尼比对体系位移反应幅值具有很强的依赖性。该文构建了位移相关粘滞阻尼模型,定义为体系初始阻尼比与当前时刻最大位移对应阻尼比的线性组合。就单自由度系统地震反应进行了数值分析,表明在阻尼比取为位移相关粘滞阻尼比平台值的条件下,常阻尼比的粘滞阻尼单自由度系统与位移相关粘滞阻尼单自由度系统的地震反应基本相同。

该文的研究工作表明结构抗震分析中采用简单的常阻尼比(等效)粘滞阻尼模型描述结构的能量耗散是合适的,同时对一些主体基本保持弹性的减隔震结构采用等效线性化的抗震分析方法亦可取。

参考文献:

- [1] Naoki Satake, Ken-ichi Suda, Toshiharu Arakawa, et al. Damping Evaluation Using Full-Scale Data of Buildings in Japan[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2003, 129(4):470-477.
- [2] J. S. Hwang, K. C. Chang, M. H. Tsai. Composite Damping Ratio of Seismically Isolated Regular Bridges [J]. Engineering Structures, 1997, 19( 1):55-62.
- [3] Chopra A K. Dynamics of Structures; Theory and Application to Earthquake Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2005.
- [4] 朱镜清. 结构抗震分析原理[M]. 北京:地震出版社, 2002.
- [5] 孔德怡,李黎,江宜城. 桥梁隔震设计中几种等效线性化方法比较研究[J]. 公路交通科技, 2008(2).
- [6] 张长青,耿波,曾嵩,等. 云南普立悬索桥粘滞阻尼器参数研究[J]. 中外公路, 2011(3).
- [7] 丁兰,杨吉新,朱伟伟. 基于粘滞阻尼器不同计算模型的斜拉桥地震反应分析[J]. 中外公路, 2011(2).