

黏弹性阻尼器在结构抗震控制中的应用

桑超,刘中华

(厦门大学建筑与土木工程学院 福建厦门 361005)

摘要:首先介绍了传统抗震理论和结构震动理论以及黏弹性阻尼器在结构的耗能减震中的应用。之后对黏弹性阻尼器的力学模型进行分析介绍,指出积分型本构关系的黏弹性阻尼器在应用中有更大灵活性。最后通过计算机模拟计算出有黏弹性阻尼器的建筑结构受到地震激励时的瞬态和稳态位移概率分布,说明黏弹性阻尼器对于地震时结构的瞬态位移响应和稳态位移响应均具有良好的减震效果,并且不同材料的黏弹性阻尼器对于在地震作用下建筑结构的瞬态或稳态位移响应有不同的减振效果。

关键词:黏弹性;结构抗震;随机激励;瞬态响应

中图分类号: TU352.1⁺1

文献标识码: B

文章编号: 1004-6135(2014)06-0076-03

Viscoelastic dampers used in seismic Control

SANG Chao LIU Zhonghua

(Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

Abstract: This paper describes the structure of the conventional seismic vibration theory and the theory describes the energy dissipation viscoelastic dampers used in the structure. After mechanical model of viscoelastic dampers analyze introduction, pointed integral constitutive relation of viscoelastic dampers have greater flexibility in the application. Finally, there are calculated by computer simulation of viscoelastic dampers building structures subjected to transient and steady-state displacement probability distribution of earthquake excitation, indicating viscoelastic dampers for transient and steady-state displacement response of the structure during an earthquake displacement response have good the damping effect, and different materials viscoelastic dampers for transient or steady-state displacement under seismic response of structures with different damping effect.

Keywords: Viscoelastic; Structural seismic; Random excitation; Transient response

E-mail: sangchaosc@126.com

引言

地震是一种随机震动。传统的抗震设计^[1]方法是综合考虑工程抗震基本理论与长期的工程抗震经验相结合而来。在工程设计一开始就考虑好能量输入、房屋形体、结构体系、刚度分布、构件延性等方面,再辅以必要的计算和构造措施,使设计出的房屋具有良好的抗震性^[2]。传统抗震方法是依靠增强结构本身的抗震性能(强度、刚度、延性)来降低地震作用的,就是由结构构件本身储存和消耗地震能量,这是被动消极的抗震方法。但是按照传统抗震理论设计的结构不具有自我调节的能量,所以结构的安全性很可能达不到安全要求。为了克服传统抗震设计的不足,提出了结构震动控制这一概念。所谓结构震动控制^[3]指采用某种措施使结构在动力荷载作用下的响应不超过某一限量,以满足工程要求。近年来,震动控制理论在结构大型化、柔性化、智能化、高精度控制等方面取得了长足发展。

本文所介绍的结构震动控制,主要是利用黏弹性阻尼器(VED)进行的耗能减震分析与设计,属于结构震动控制中的被动控制。

1 黏弹性阻尼器



基金项目: 本文得到国家自然科学基金项目(11372262)资助。

作者简介: 桑超(1986.12-),男。

收稿日期: 2014-03-23

1.1 黏弹性阻尼器简介

黏弹性阻尼器^[4-5](VED)是一种速度相关型耗能装置。黏弹性阻尼器(VED)最早应用在飞行器中用以控制骨架振动疲劳,后来引入到建筑结构中控制风振,现在普遍用于控制风振和地震反应。其在国内外工程中都有应用,世界上第一个应用VED来减小结构风致振动的是1969年美国的世界贸易中心双塔楼高层建筑^[6]。1972年建成的110层高的纽约世界贸易中心,总共安装看10000多个黏弹性阻尼器,还有在美国西雅图的76层高的哥伦比亚中心大厦也安装了260多个黏弹性阻尼器。黏弹性阻尼器是一种有效的被动减震控制装置,其主要依靠黏弹性材料的滞回耗能特性,给结构提供附加刚度和阻尼,减小结构的动力反应,以达到减震的目的。主要是由黏弹性材料和约束钢板组成,钢板和黏弹性材料通过硫化的方法黏结在一起。

常用的黏弹性材料主要有高分子聚合物,这种材料即有黏性也有很好的弹性,可以在变形时将吸收的能量转换成热量散发出去,可以用来减小结构的风振和地震反应^[7],这种材料的黏弹性阻尼器已经得到广泛的应用。

1.2 黏弹性阻尼器力学模型

许多物质或材料往往兼具弹性和黏性两种不同机理的变形,综合的呈现弹性固体和黏性流体两者的力学行为,物质的这种性能称为黏弹性。黏弹体可以理解为是弹性体与液体的混合物。在黏弹体发生应变的时候,其中的弹性部分承担静态的应力,而液体部分不承担静态的应力。当应变对时间的导数

不为零的时候,液体部分由于存在微观摩擦,出现黏度,而承担动态的应力。因此,一个静态的黏弹体与一个纯弹性体相当。黏弹性一词来源于模型理论,即这种性质可以用弹性元件和黏性元件串联或并联组合而成的某种典型模型加以表示,如 Maxwell 模型、Kelvin 模型、标准线性固体模型等。材料的黏弹性性质,可以用模型来表示,这些力学模型由离散的弹性元件与黏性元件——弹簧和阻尼器——以不同方式组合而成。黏弹性材料的应力-应变-时间关系。主要有微分型和积分型两大类。微分型本构关系在求解某些问题时比较方便,在黏弹性理论的早期发展中有广泛的应用。

1.2.1 微分型本构关系

弹性元件的本构关系

$$\sigma = E\varepsilon \text{ 或 } \tau = G\gamma \quad (2.2.1)$$

上式中 σ 、 τ 、 ε 、 γ 分别为正应力、剪应力、正应变、剪应变; E 、 G 分别为拉压弹性模量和剪切弹性模量。这种应力应变关系不随时间而发生变化,呈现出瞬时的弹性变形和瞬时回复。

黏性元件即阻尼器,有时称为黏壶的本构关系

$$\sigma = \eta\dot{\varepsilon} \text{ 或 } \tau = \eta_1\dot{\gamma} \quad (2.2.2)$$

上式中 η 或 η_1 为黏性系数; $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$ 为应变率。

黏弹性材料基本模型就是由 (2.2.1) 和 (2.2.2) 式描述的二种简单情况的某种组合。

Maxwell 模型

Maxwell 模型由弹性元件和黏性元件串联而成,如图 1 所示

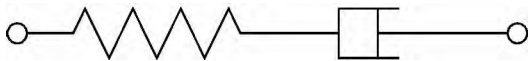


图 1 Maxwell 模型

设在应力 σ 作用下,弹簧和阻尼器的应变分别为 ε_1 和 ε_2 , 则总应变为

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (2.2.3)$$

利用 (2.2.1) 和 (2.2.2) 式,得到

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \text{ 或者 } \sigma + p_1\dot{\sigma} = q_1\dot{\varepsilon} \quad (2.2.4)$$

上式中 $p_1 = \frac{\eta}{E}$ 和 $q_1 = \eta$ 均表示材料常数。式 (2.2.4) 就是 Maxwell 模型的应力应变微分本构关系。如果材料常数为已知,则可用该本构关系来分析蠕变、回复以及应力松弛现象。Maxwell 模型的应变是一个无限增大的过程,这是典型的流体特征。

Kelvin 模型

Kelvin 模型由弹簧和阻尼器并联而成,如图 2 所示。

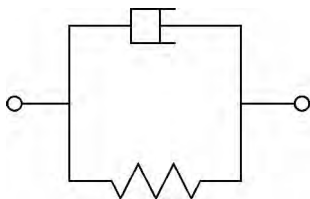


图 2 Kelvin 模型

Kelvin 模型又称 Kelvin-Voigt 模型。两个元件的应变都等于模型的总应变,而模型的总应力为两元件应力之和。

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (2.2.5)$$

将式 (2.2.1) 和 (2.2.2) 代入上式得到 Kelvin 模型的本构关系

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} \text{ 或 } \sigma = q_0\varepsilon + q_1\dot{\varepsilon} \quad (2.2.6)$$

式中 $q_1 = E$, $q_0 = \eta$ 。在常应力作用下, Kelvin 模型的应变单调增加,但不是无限增大,而是趋向于某一极限。

三参量固体模型

三参量固体模型又称为标准线性固体模型,它是由一个 Kelvin 模型和一个弹簧串联而成。如图 3 所示。

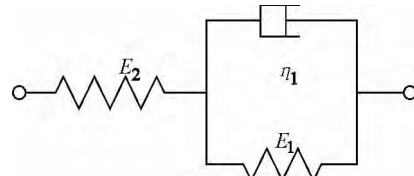


图 3 三参量固体模型

三参量固体模型的本构关系是采用拉普拉斯变换与逆变换来推导的

$$E_1E_2\varepsilon + E_2\eta_1\dot{\varepsilon} = (E_1 + E_2)\sigma + \eta_1\dot{\sigma} \text{ 或 } \sigma + p_1\dot{\sigma} = q_0\varepsilon + q_1\dot{\varepsilon} \quad (2.2.7)$$

式中 $p_1 = \frac{\eta_1}{E_1 + E_2}$ 、 $q_0 = \frac{E_1E_2}{E_1 + E_2}$ 及 $q_1 = \frac{E_2\eta_1}{E_1 + E_2}$ 。三参量

固体模型的蠕变特性与 Kelvin 模型相似,也是一个单调增大,且趋向于极限值的过程。所不同的是,它与 Maxwell 模型一样,都存在一个瞬态弹性响应,即在常应力作用的同时,模型就产生一个初始的应变。

1.2.2 积分型本构关系

为了更具体的表示材料的黏弹性行为并利于实际测试,更好地描述材料的记忆性能和物体受外载作用后的过程,便于考虑材料老化和温度影响等因素,在实际应用中往往采用积分型的本构方程^[8]。积分型本构关系是根据 Boltzmann 叠加原理和遗传积分建立的。

蠕变型本构关系

$$\varepsilon(t) = \sigma_0 J(t) + \int_{0^+}^t J(t-\zeta) \frac{d\sigma(\zeta)}{d\zeta} d\zeta \quad (2.2.8)$$

或变形为

$$\varepsilon(t) = J(t)\sigma(t) + \int_{0^+}^t \sigma(\zeta) \frac{dJ(t-\zeta)}{d(1-\zeta)} d\zeta \quad (2.2.9)$$

式中 $J(t)$ 为蠕变模量。

松弛型本构关系

$$\sigma(t) = \varepsilon(t)Y(0) + \int_{0^+}^t \varepsilon(\zeta) \frac{dY(1-\zeta)}{d(1-\zeta)} d\zeta \quad (2.2.10)$$

或

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t Y(t-\zeta) \dot{\varepsilon}(\zeta) d\zeta \quad (2.2.11)$$

式中 $Y(t)$ 为松弛模量。本文模拟计算中所采用的黏弹性模型为松弛型本构关系。

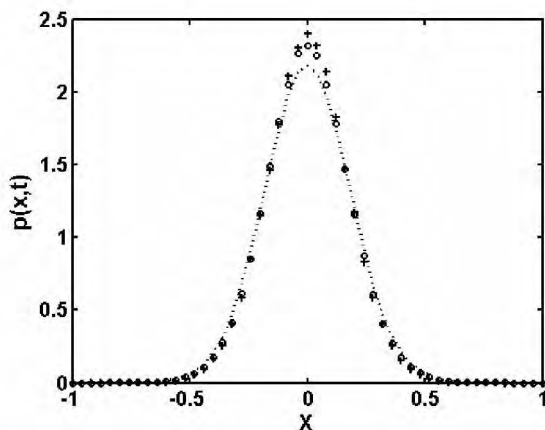
2 模拟计算

对于一个建筑结构受到地震随机激励的情况可以用以下的方程进行模拟分析:

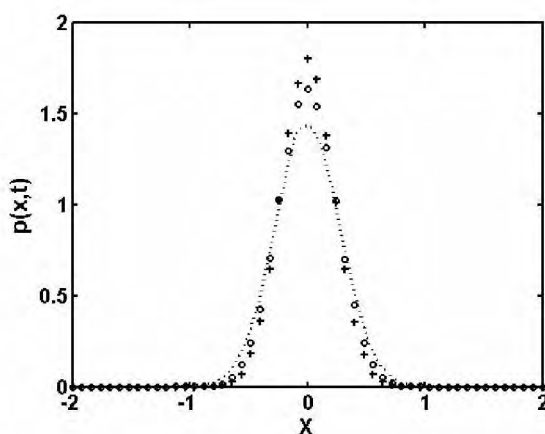
$$\ddot{X} + \alpha\dot{X}(t) + \beta X^2 X(t) + \omega_0^2 X + cX^3 + d \int_0^t e^{-\lambda(t-\tau)} X(\tau) d\tau = W(t) \quad (3.1)$$

上式中 $\int_0^t e^{-\lambda(t-\tau)} X(\tau) d\tau$ 为黏弹性阻尼器模型 z 是和这个黏弹性阻尼器本身材料有关的系数, $W(t)$ 为强度为 $2D$ 的高斯白噪声, 这里我们用高斯白噪声来模拟地震随机激励, $\alpha, \beta > 0$ 分别为建筑结构的线性和非线性阻尼系数, ω_0 为建筑物的自身频率, ρ 为非线性刚度系数。

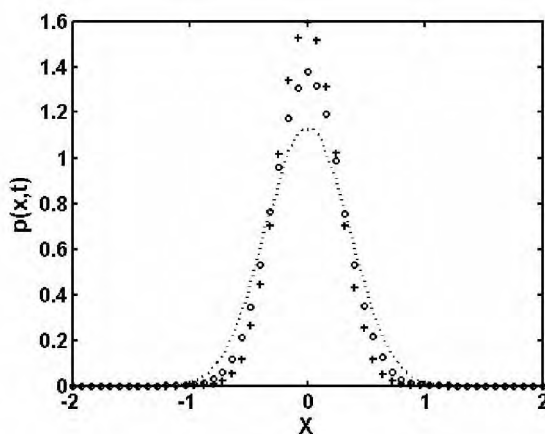
数值模拟的参数分别是 $\alpha = 0.01$, $\beta = 0.01$, $\omega_0 = 1$, $D = 0.02$, $\rho = 0.1$, $d = 0.05$ 。



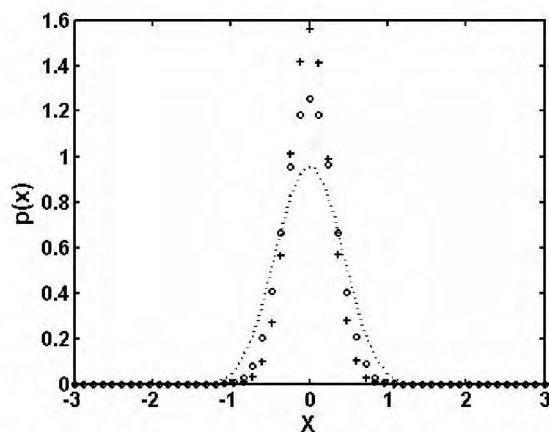
(a)



(b)



(c)



(d)

图3 位移 X 的概率密度

((a) $t = 20s$ (b) $t = 50s$ (c) $t = 100s$ (d) 稳态)

(图中虚线表示没有安装黏弹性阻尼器的结构位移概率密度, \circ 表示 $z = 0.2$, $+$ 表示 $z = 2$)

从模拟计算得出的位移概率分布图中可以看出有黏弹性阻尼器的建筑结构受到外激时瞬态位移振幅和稳态位移振幅均比没有黏弹性阻尼器的建筑结构受到外激时位移振幅要小。并且对于不同材料的黏弹性阻尼器(的取值不同)其减振效果是不一样的,在实际工程中可以根据需要选择适合的黏弹性材料。

3 结语

综合国内外学者的研究成果以及通过对一个结构进行数值模拟计算得出:有黏弹性阻尼器的建筑结构受到外激时瞬态位移振幅比没有黏弹性阻尼器的建筑结构受到外激时瞬态位移振幅要小;有黏弹性阻尼器的建筑结构受到外激时稳态位移振幅比没有黏弹性阻尼器的建筑结构受到外激时稳态位移振幅要小;不同材料的黏弹性阻尼器对于在地震作用下建筑结构的瞬态或稳态位移响应有不同的减振效果,实际应用中可以根据需要选择不同材料的黏弹性阻尼器。

参考文献

- [1] 武守国. 钢筋混凝土结构抗震设防目标及实现步骤研究[J]. 华北地震科学, 2009, 27(1): 57-59.
- [2] 周春霖, 陆浩亮, 朱合华. 桩土共同作用下桩长对结构抗震性能影响分析[J]. 华北地震科学, 2009, 27(3): 7-11.
- [3] 赵士永, 李旭光. 砌体结构并联复合隔震建筑有限元分析[J]. 华北地震科学, 2011, (2): 23-27.
- [4] 蔡克铨, 赖俊维. 屈服束制支撑之原理及应用[A]. 王志华. 首届全国防灾减灾工程学术研讨会论文集[C]. 南京: 中国科学出版社, 2004. 6-10.
- [5] De Matties C, Landolgo T, Mazzolani F M. Seismic response of MR steel frames with low-yield steel shear panels[J]. Engineering Structures, 2003, 25: 155-168.
- [6] Mahmoodi E. Structural Dampers. ASCE, Journal of Structural Division [J], 1969, 95(8).
- [7] 刘军生. 粘弹性阻尼器在钢筋混凝土框架结构中的应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- [8] 杨挺青, 罗文波等. 黏弹性理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.