

DOI: 10.7511/jslx20221005001

高效耗能黏弹性阻尼框架结构减震性能研究

张 敏^{*1,2}, 舒磊兴²

(1. 江西科技师范大学 建筑工程学院, 南昌 330038; 2 华东交通大学 土木建筑学院, 南昌 330038)

摘要: 提出了高效耗能黏弹性阻尼器, 研究了该阻尼器对框架结构的减震机理。首先给出了高效耗能黏弹性阻尼器的结构构造, 推导了小震、大震与巨震作用下的阻尼放大系数计算公式, 由此分析了该放大系数的变化规律。此外, 还推导了设置高效耗能黏弹性阻尼框架结构的等效阻尼比。分析表明, 框架结构设置高效耗能黏弹性阻尼器在阻尼等效前后顶部位移反应时程曲线相差不超过 10%。

关键词: 框架; 阻尼; 高效; 减震; 黏弹性; 等效; 放大

中图分类号: O327

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2024)03-0437-09

1 引言

随着土木工程的快速发展, 对房屋结构的减震需求越来越高。有学者对结构设置耗能减震装置来提高结构的抗震能力, 其中黏弹性阻尼器因其耗能能力强、灵敏度高、制作及安装简便等优点而成为常用的耗能减震装置之一, 因此很多学者研究了设置黏弹性阻尼器结构的减震性能。

文献[1]采用振动控制理论研究了设置黏弹性阻尼器结构的减震性能, 认为设置黏弹性阻尼器能有效减弱结构的地震响应。文献[2]得出设置黏弹性阻尼器框架结构地震作用的计算方法, 并给出了楼层阻尼器的经济分布公式。文献[3]分析了支撑刚度对阻尼器减震性能影响, 表明支撑系数超过一定数值时, 该支撑几乎不影响黏弹性阻尼器的减震性能。文献[4,5]在文献[2,3]基础上, 补充验证了文献[2,3]时域分析得出的结论, 发现各楼层均匀设置黏弹性阻尼器能有效减小结构地震响应, 此外还研究了楼层经济布置阻尼器的计算公式。文献[6]分析了黏弹性阻尼耗能框架结构的随机地震反应, 研究了阻尼系数对结构楼层位移方差的影响规律。文献[7]研究了结构地震响应随阻尼器与结构连接方式的变化规律, 表明当阻尼器与结构采用合适的方式连接时, 阻尼器对结构减震性能影响较

强。文献[8]给出了黏弹性阻尼器在结构楼层合理设置的实用方法。提高了结构在各级地震动作用下的性能, 从而满足规范给出的位移限值要求。文献[9]运用延拓法研究了黏弹性阻尼耗能框架结构的动力特性, 表明该方法有效而准确, 且黏弹性阻尼器可明显降低结构的地震反应。文献[10]针对黏弹性阻尼器, 给出了 Maxwell 模型下黏弹性阻尼力和位移的关系式, 以及黏弹性阻尼器消耗输入能量的分析方法。文献[11]提出一种位移放大型油阻尼器, 通过放大阻尼器两端相对位移来提高阻尼器产生的阻尼力, 最终以较少的布置数量达到普通阻尼器的减震效果。文献[12]提出一种能放大阻尼器输出位移的悬臂肘节型黏滞阻尼器, 研究表明该系统能将阻尼器输出位移放大 3~5 倍。文献[13]提出一种剪刀型 SMA 阻尼器, 研究发现, 结构安装该阻尼器后在地震作用下能明显减小结构的地震响应。文献[14]推导了黏滞和黏弹性阻尼器的等效刚度和等效阻尼的解析公式, 得出了带支撑黏滞和黏弹性阻尼器的等效刚度和等效阻尼的一般结果。文献[15]建立了设置带支撑的黏滞和黏弹性阻尼器结构随机响应特性的统一解析解法, 得到了随机响应特性分析的解析解。

本文在前人研究基础上, 提出高效耗能黏弹性阻尼器, 以增强对结构的减震耗能, 为框架结构耗

收稿日期: 2022-10-05; 修改稿收到日期: 2023-01-06.

基金项目: 国家自然科学基金(51368007)资助项目。

作者简介: 张 敏*(1965-), 男, 博士, 教授(E-mail: zhmzm@126.com).

引用本文: 张 敏, 舒磊兴. 高效耗能黏弹性阻尼框架结构减震性能研究[J]. 计算力学学报, 2024, 41(3): 437-444, 505.

ZHANG Min, SHU Lei-xing. Analysis of damping performance of the frame structure with high-efficiency energy dissipation viscoelastic dampers[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(3): 437-444, 505.

能减震设计提供参考。

2 高效耗能黏弹性阻尼器减震机理

2.1 构造简图

高效耗能黏弹性阻尼器是通过力学装置将设置在其中的传统黏弹性阻尼器的阻尼系数放大,从而增强对结构的减震性能,达到采用阻尼系数较小的传统黏弹性阻尼器实现高效耗能减震的效果。其构造如图 1 所示。

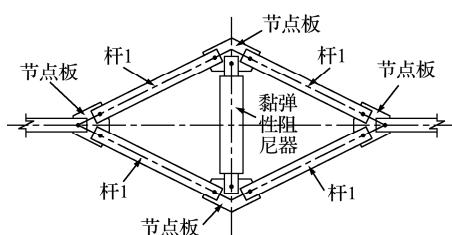


图 1 高效耗能黏弹性阻尼器构造

Fig. 1 Construction diagram of high-efficiency energy dissipation viscoelastic damper

图 1 中杆 1 为四根斜置、截面尺寸相同的杆件,利用螺栓和节点板将杆 1 两两相连成菱形,将传统黏弹性阻尼器用螺栓和节点板置于菱形的较短对角线上与杆 1 相连,从而构成高效耗能黏弹性阻尼器。该阻尼器沿楼层对角安装在钢筋混凝土框架结构中,如图 2 所示。

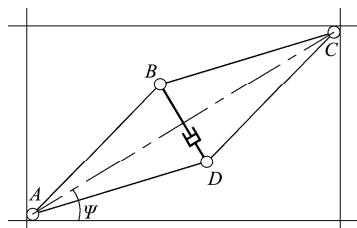


图 2 高效耗能黏弹性阻尼器楼层安装

Fig. 2 High-energy dissipation viscoelastic damper

2.2 高效耗能黏弹性阻尼器的阻尼放大系数推导

高效耗能黏弹性阻尼器力学分析如图 3 所示。

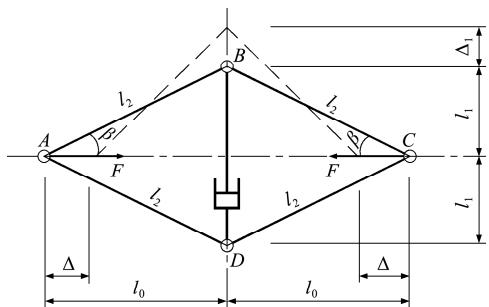


图 3 高效耗能黏弹性阻尼器分析简图

Fig. 3 Analysis diagram of high-efficiency energy dissipation viscoelastic damper

图 3 中菱形四条边长均为 l_2 , 当水平推力 F

分别作用在节点 A 和 C 时,根据图 3,黏弹性阻尼器 BD 阻尼力为 $F_1 = F \cdot \tan\beta$, 其中 β 为图 3 结构受水平推力 F 作用变形前、后杆 AB 及杆 BC 与对角线 AC 的夹角。

图 3 中由于节点 A 和节点 C 受到水平推力 F 的作用,产生图示位移 Δ ,则节点 B 和节点 D 沿竖向的位移均为 Δ_1 (图中仅绘出节点 B 的位移),假定 AB, BC, CD 和 AD 四杆的轴向变形分别为 Δ_2 ,根据几何条件可得

$$(l_0 - \Delta)^2 + (l_1 + \Delta_1)^2 = (l_2 - \Delta)^2 \quad (1)$$

当 AB, BC, CD 和 AD 四杆具有足够大的轴向刚度,均处于弹性范围时,因为 $\Delta_2 \ll l_2$, 可近似取 $\Delta_2 \approx 0$, 则式(1)化简可得

$$\Delta(\Delta - 2l_0) + \Delta_1(\Delta_1 + 2l_1) = 0 \quad (2)$$

小震作用,各杆件受力均处于弹性范围,层间位移与构件尺寸相比很小,即 $\Delta \ll l_0, \Delta_1 \ll l_1$, 式(2)可化简,得

$$\Delta_1 \approx l_0/l_1 \cdot \Delta \quad (3)$$

大震或巨震作用下,结构处于弹塑性状态,层间位移较大,式(2)化简,得

$$\Delta_1 = \sqrt{l_2^2 - (l_0 - \Delta)^2} - l_1 \quad (4)$$

式(2)对时间 t 求导,可得

$$\dot{\Delta}_1 = \dot{\Delta}(l_0 - \Delta)/(l_1 + \Delta_1) \quad (5)$$

传统黏弹性阻尼器采用 Maxwell 模型,计算简图如图 4 所示。

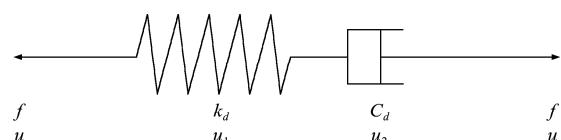


图 4 黏弹性阻尼器 Maxwell 模型

Fig. 4 Maxwell model of viscoelastic damper

该模型由弹簧单元和阻尼单元串联而成。图 4 中 f 和 u 分别为阻尼器的阻尼力和两端相对位移, k_d 和 c_d 分别为 Maxwell 模型的刚度系数与阻尼系数, u_1 和 u_2 分别为 Maxwell 模型的弹簧单元和阻尼单元对应的位移。

Maxwell 模型采用下列力学关系

$$u_1(t) + u_2(t) = u(t) \quad (6)$$

$$k_d \cdot u_1(t) = c_d \cdot \dot{u}_2(t) = f(t) \quad (7)$$

定义松弛时间系数 $\eta = c_d/k_d$, 则 $c_d = \eta \cdot k_d$, 由式(6,7)可得

$$\eta f(t) + f(t) = c_d \cdot \dot{u}(t) \quad (8)$$

方程(8)的解为

$$f(t) = \int_0^t \frac{c_d}{\eta} \dot{u}(\tau) \cdot e^{-\frac{1}{\eta}(t-\tau)} d\tau \quad (9)$$

式(9)为黏弹性阻尼器的阻尼力与阻尼器两端相对位移的积分关系式。

对图1高效耗能黏弹性阻尼器,令图中设置的传统黏弹性阻尼器的阻尼系数为 c_{d1} ,其两端相对位移为 $2\Delta_1$,松弛时间系数为 η ,根据式(9),可得该传统黏弹性阻尼器的阻尼力 $f_1(t)$ 为

$$f_1(t) = \int_0^t \frac{c_{d1}}{\eta} \cdot 2\dot{\Delta}_1(\tau) \cdot e^{-\frac{1}{\eta}(t-\tau)} d\tau \quad (10)$$

令图1高效耗能黏弹性阻尼器的阻尼系数为 c_d ,两端水平相对位移为 2Δ ,松弛时间系数为 η ,根据式(9),该高效耗能黏弹性阻尼器的阻尼力 $f(t)$ 为

$$f(t) = \int_0^t \frac{c_d}{\eta} \cdot 2\dot{\Delta}(\tau) \cdot e^{-\frac{1}{\eta}(t-\tau)} d\tau \quad (11)$$

从图3力学关系可得

$$f_1 = f \cdot \operatorname{tg} \beta = f \cdot [(l_1 + \Delta_1)/(l_0 - \Delta)] \quad (12)$$

将式(10,11)代入式(12),并考虑式(5),可得

$$c_d = c_{d1} \cdot [(l_0 - \Delta)/(l_1 + \Delta_1)]^2 \quad (13)$$

小震作用下,结构处于弹性状态,可得

$$c_d = c_{d1} \cdot (l_0/l_1)^2 \quad (14)$$

可见,只要 $l_0 > l_1$,就能将阻尼系数 c_{d1} 放大 $(l_0/l_1)^2$ 倍。

大震或巨震作用下,结构处于弹塑性状态,由式(13)可得

$$c_d = c_{d1} \cdot \left\{ [(l_0 - \Delta)^2 / [l_2^2 - (l_0 - \Delta)^2]] \right\} \quad (15)$$

定义阻尼放大系数

$$R = c_d/c_{d1} \quad (16)$$

小震作用下,可得

$$R = (l_0/l_1)^2 \quad (17)$$

大震或巨震作用下,可得

$$R = (l_0 - \Delta)^2 / [l_2^2 - (l_0 - \Delta)^2] \quad (18)$$

式(16)表明,高效耗能黏弹性阻尼器可以在松弛时间系数 η 不变的前提下,将传统阻尼器的阻尼系数 c_{d1} 放大 R 倍,即

$$c_d = c_{d1} \cdot R \quad (19)$$

式(18)表明,大震或巨震作用下,阻尼放大系数与层间侧移有关,若要达到希望的阻尼放大系数 \bar{R} ,根据《建筑结构抗震规范》对层间位移角的限值 ρ (框架结构 $\rho=1/50$),考虑高效耗能黏弹性阻尼器的安装方式(图2),可得该高效耗能黏弹性阻尼器两端相对位移限值 $|\Delta_{\max}| = \rho \cdot h \cdot \cos \Psi$,其中 h 为楼层净高, Ψ 为高效耗能黏弹性阻尼器与楼面夹角,如图2所示,取

$$R_{\min} = \frac{(l_0 - \rho h \cdot \cos \Psi)^2}{l_2^2 - (l_0 - \rho h \cdot \cos \Psi)^2} \geq \bar{R} \quad (20)$$

$$l_0 \geq \sqrt{\bar{R}(1+\bar{R})\rho^2 h^2 \cos^2 \Psi + \bar{R}l_1^2} + (1+\bar{R})\rho h \cdot \cos \Psi \quad (21)$$

式(20,21)表明,大震或巨震作用下,若要将传统阻尼器的阻尼系数放大不小于 \bar{R} 倍,只要 l_0 满足

式(21)即可获得需要的高效耗能黏弹性阻尼器。

2.3 杆1的刚度要求

上述推导假设图1中四根杆1的轴向刚度满足其受力均处于弹性状态的要求,因而忽略了各杆1的轴向变形,若要达到此要求,则各杆1的截面面积可按如下推导。

假设图1中各杆1的极限承载力为 $f_{2\max}$,由图3可得图1中黏弹性阻尼器受力最大值 $f_{1\max} = 2f_{2\max} \cdot [(l_1 + \Delta_1)/l_2]$,因而可得

$$f_{2\max} = \frac{f_{1\max}}{2} \cdot \frac{l_2}{(l_1 + \Delta_1)_{\min}} \quad (22)$$

由式(22)并根据式(2),取 $\Delta = -\rho h \cdot \cos \Psi$,可得

$$f_{2\max} = \frac{f_{1\max}}{2} \cdot \frac{l_2}{\sqrt{l_1^2 - \rho^2 h^2 \cdot \cos^2 \Psi - 2\rho h l_0 \cdot \cos \Psi}} \quad (23)$$

可得每根杆1的横截面面积为

$$A \geq \frac{f_{2\max}}{f_y} = \frac{f_{1\max}}{2f_y} \cdot \frac{l_2}{\sqrt{l_1^2 - \rho^2 h^2 \cdot \cos^2 \Psi - 2\rho h l_0 \cdot \cos \Psi}} \quad (24)$$

式中 f_y 为杆1的屈服强度。

可见根据图1中黏弹性阻尼器 $f_{1\max}$,可以采用式(24)得出各杆1的截面面积,从而确保各杆1在弹性状态受力。需要注意的是,若杆1采用钢构件,尚需满足稳定要求。

以上分析显示,若结构空间足够,只需将图3中 l_0 按式(21)设置,在小震作用下,该高效耗能阻尼器可放大阻尼系数 $(l_0/l_1)^2$ 倍,而大震或巨震作用下至少可放大阻尼系数 \bar{R} 倍,从而获得高效耗能的减震效果,以满足在小震、大震与巨震作用下对框架结构的高效耗能减震需求。

2.4 阻尼放大系数变化规律

小震作用下,高效耗能黏弹性阻尼器的阻尼放大系数 $R = (l_0/l_1)^2$;大震或巨震作用下,阻尼放大系数 R 变化规律见式(18),两者变化规律如图5所示。可以看出,小震作用下,阻尼放大系数 R 随 l_0/l_1 增大而增大;大震或巨震作用下,随着阻尼器两端相对位移增大,阻尼放大系数呈不同程度降低,当达到位移限值时,阻尼放大效果达到最小值。

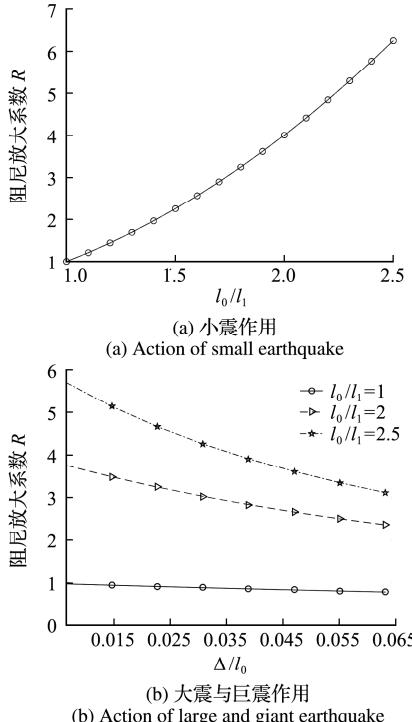
2.5 高效耗能黏弹性阻尼框架结构等效阻尼推导

式(6,7)傅里叶变换,可得

$$U_1(\omega) + U_2(\omega) = U(\omega) \quad (25)$$

$$k_d U_1(\omega) = i\omega \cdot c_d U_2(\omega) = F(\omega) \quad (26)$$

式中 ω 为谐振圆频率, $U_1(\omega)$, $U_2(\omega)$ 和 $U(\omega)$ 分别为 $u_1(t)$, $u_2(t)$ 和 $u(t)$ 的傅里叶变换; $F(\omega)$ 为 $f(t)$ 的傅里叶变换, i 为虚数单位。

图 5 阻尼放大系数 R 变化规律Fig. 5 Variation of damping amplification factor R

$$[R \cos^2 \Psi \cdot C_d^*(\omega)] =$$

$$\begin{bmatrix} R_1 \cos^2 \Psi_1 C_{d1}^* + R_2 \cos^2 \Psi_2 C_{d2}^* & -R_2 \cos^2 \Psi_2 C_{d2}^* & 0 & 0 \\ -R_2 \cos^2 \Psi_2 C_{d2}^* & R_2 \cos^2 \Psi_2 C_{d2}^* + R_3 \cos^2 \Psi_3 C_{d3}^* & -R_3 \cos^2 \Psi_3 C_{d3}^* & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -R_i \cos^2 \Psi_i C_{di}^* & R_i \cos^2 \Psi_i C_{di}^* + R_{i+1} \cos^2 \Psi_{i+1} C_{d(i+1)}^* \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_{i+1} \cos^2 \Psi_{i+1} C_{d(i+1)}^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_{n-1} \cos^2 \Psi_{n-1} C_{d(n-1)}^* & R_{n-1} \cos^2 \Psi_{n-1} C_{d(n-1)}^* + R_n \cos^2 \Psi_n C_{dn}^* & -R_n \cos^2 \Psi_n C_{dn}^* & 0 \\ 0 & -R_n \cos^2 \Psi_n C_{dn}^* & R_n \cos^2 \Psi_n C_{dn}^* & 0 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$[R \cos^2 \Psi \cdot K_d^*(\omega)] =$$

$$\begin{bmatrix} R_1 \cos^2 \Psi_1 K_{d1}^* + R_2 \cos^2 \Psi_2 K_{d2}^* & -R_2 \cos^2 \Psi_2 K_{d2}^* & 0 & 0 \\ -R_2 \cos^2 \Psi_2 K_{d2}^* & R_2 \cos^2 \Psi_2 K_{d2}^* + R_3 \cos^2 \Psi_3 K_{d3}^* & -R_3 \cos^2 \Psi_3 K_{d3}^* & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -R_i \cos^2 \Psi_i K_{di}^* & R_i \cos^2 \Psi_i K_{di}^* + R_{i+1} \cos^2 \Psi_{i+1} K_{d(i+1)}^* \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_{i+1} \cos^2 \Psi_{i+1} K_{d(i+1)}^* & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -R_{n-1} \cos^2 \Psi_{n-1} K_{d(n-1)}^* & R_{n-1} \cos^2 \Psi_{n-1} K_{d(n-1)}^* + R_n \cos^2 \Psi_n K_{dn}^* & -R_n \cos^2 \Psi_n K_{dn}^* & 0 \\ 0 & -R_n \cos^2 \Psi_n K_{dn}^* & R_n \cos^2 \Psi_n K_{dn}^* & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

令 $F(\omega) = K^*(\omega) \cdot U(\omega)$, 代入式(25, 26), 可解方程得

$$K^*(\omega) = \frac{c_d \eta \omega^2 + i \omega c_d}{1 + \eta^2 \omega^2} \quad (27)$$

式中 $K^*(\omega)$ 为黏弹性阻尼器的复刚度。

$$\text{令 } K_d^*(\omega) = \frac{c_d \eta \omega^2}{1 + \eta^2 \omega^2}, C_d^*(\omega) = \frac{c_d}{1 + \eta^2 \omega^2}, \text{ 式}$$

(27)可写为

$$K^*(\omega) = K_d^*(\omega) + i \omega \cdot C_d^*(\omega) \quad (28)$$

根据式(28)可得, 阻尼放大系数为 R 的高效耗能黏弹性阻尼器, 在松弛时间系数 η 不变的前提下, 其复刚度为

$$\tilde{K}^*(\omega) = R \cdot K_d^*(\omega) + i \omega \cdot R \cdot C_d^*(\omega) \quad (29)$$

考虑阻尼器安装, 如图 2 所示, 框架各楼层高效耗能黏弹性阻尼器的水平阻尼力向量为

$$\{\cos \Psi \cdot F(\omega)\} = [\cos^2 \Psi \cdot \tilde{K}^*(\omega)] \{X\} \quad (30)$$

根据式(29)可得

$$\begin{aligned} \{\cos \Psi \cdot F_x(\omega)\} = & \{i \omega [R \cos^2 \Psi \cdot C_d^*(\omega)] + \\ & [R \cos^2 \Psi \cdot K_d^*(\omega)]\} \{x\} \end{aligned} \quad (31)$$

$$K_{d,i}^*(\omega) = \frac{c_{d,i}\eta_i\omega^2}{1+\eta_i^2\omega^2}, C_{d,i}^*(\omega) = \frac{c_{d,i}}{1+\eta_i^2\omega^2} \quad (34)$$

式中 R_i 为第 i 楼层高效耗能黏弹性阻尼器的阻尼放大系数, $k_{d,i}$ 和 $c_{d,i}$ 为第 i 楼层黏弹性阻尼器的刚度系数与阻尼系数, η_i 为第 i 楼层黏弹性阻尼器的松弛时间系数, Ψ_i 为 i 楼层高效耗能黏弹性阻尼器与楼面夹角, 如图 2 所示。

将高效耗能黏弹性阻尼器对楼层的水平阻尼力向量 $\{\cos\Psi\cdot f(t)\}$ 等效为

$$\{\cos\Psi\cdot f(t)\} = [\cos^2\Psi\cdot C_d]\{\dot{x}\} + [\cos^2\Psi\cdot K_d]\{x\} \quad (35)$$

式中 $[K_d]$ 和 $[C_d]$ 分别为高效耗能阻尼器的等效刚度和等效阻尼矩阵; $\{x\}$ 为层相对结构基础位移向量。

式(35)傅里叶变换, 得

$$\{\cos\Psi\cdot F(\omega)\} = \{i\omega[\cos^2\Psi\cdot C_d] + [\cos^2\Psi\cdot K_d]\}\{X\} \quad (36)$$

式中 $\{\cos\Psi\cdot F(\omega)\}$ 为 $\{\cos\Psi\cdot f\}$ 的傅里叶变换, $\{X\}$ 为 $\{x\}$ 的傅里叶变换。

比较式(31)和式(36), 可得

$$[\cos^2\Psi\cdot C_d] = [R\cos^2\Psi\cdot C_d^*(\omega)] \quad (37)$$

$$[\cos^2\Psi\cdot K_d] = [R\cos^2\Psi\cdot K_d^*(\omega)] \quad (38)$$

仅考虑第 j 振型, 令 $\{x\} = \{\varphi_j\}q_j$, 高效耗能黏弹性阻尼器按第 j 振型振动 1 周的耗能为

$$E_{d,j} = \oint \{\varphi_j\}^T \{\cos\Psi\cdot f\} dq_j = \oint \{\varphi_j\}^T [\cos^2\Psi\cdot C_d]\{\varphi_j\} \dot{q}_j dq_j \quad (39)$$

令 $\bar{c}_j = \{\varphi_j\}^T [\cos^2\Psi\cdot C_d]\{\varphi_j\}$, 可得

$$E_{d,j} = \oint \bar{c}_j \dot{q}_j dq_j \quad (40)$$

将式(37)代入式(39), 令 $\bar{C}_j^*(\omega) = \{\varphi_j\}^T [R\cos^2\Psi\cdot C_d^*(\omega)]\{\varphi_j\}$, 可得

$$E_{d,j}^* = \oint \bar{C}_j^*(\omega) \dot{q}_j dq_j \quad (41)$$

根据文献[16, 17], 地震波 $\ddot{x}_g(t)$ 可视为 N 阶频率的谐振波叠加, 表示为

$$\ddot{x}_g(t) = I(t) \sum_{s=1}^N A_s \sin(\omega_s t + \varphi_s) \quad (42)$$

$$I(t) = \begin{cases} (t/t_1)^{\lambda_1} & (0 \leq t \leq t_1) \\ 1 & (t_1 \leq t \leq t_2) \\ e^{-\lambda_2(t-t_2)} & (t_2 \leq t) \end{cases} \quad (43)$$

$$A_s = \sqrt{4S_g(\omega_s) \cdot \Delta\omega}, \omega_s = \frac{2\pi s}{T}, \Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (44)$$

式中 $I(t)$ 为强度包络线, 取 $t_1 = 0.5T, t_2 = 1.5T$; $S_g(\omega_s)$ 为 $\ddot{x}_g(t)$ 的功率谱密度, ω_s 为第 s 阶谐振地震波的频率, φ_s 为 $0 \sim 2\pi$ 范围内相互独立和均匀分布的随机相位角, N 为地震波的总阶数, T 为

$\ddot{x}_g(t)$ 的总持时。

稳态地震谐振波 $\ddot{x}_g(t)$ 作用下, 第 j 阶正则坐标为

$$q_j(t) = \sum_{s=1}^N q_{msj} \sin(\omega_s t + \phi_s) \quad (45)$$

式中 q_{msj} 为第 s 阶地震波作用下, 第 j 阶正则坐标幅值。

式(45)分别代入式(40, 41), 可得

$$E_{d,j} = 2 \sum_{s=1}^N \int_0^{2\pi/\omega_s} \bar{c}_j \dot{q}_j(t) dq_j = 2 \sum_{s=1}^N \pi \bar{c}_j \omega_s q_{msj}^2 \quad (46)$$

$$E_{d,j}^* = 2 \sum_{s=1}^N \int_0^{2\pi/\omega_s} \bar{C}_j^*(\omega_s) \dot{q}_j(t) dq_j = 2 \sum_{s=1}^N \pi \bar{C}_j^*(\omega_s) \omega_s q_{msj}^2 \quad (47)$$

由 $E_{d,j}^* = E_{d,j}$, 可得

$$\bar{c}_j = \sum_{s=1}^N \bar{C}_j^*(\omega_s) \omega_s q_{msj}^2 / \left(\sum_{s=1}^N \omega_s q_{msj}^2 \right) \quad (48)$$

由结构动力学理论, 可得

$$q_{msj} = [\gamma_j I(t) A_s / \omega_{nj}^2] \bar{R}_{js} \quad (49)$$

$$\bar{R}_{js} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\omega_s / \omega_{nj})^2]^2 + [2(\xi_{dj} + \xi)(\omega_s / \omega_{nj})]^2}} \quad (50)$$

式中 γ_j 为第 j 振型参与系数, \bar{R}_{js} 为第 s 阶地震波作用下第 j 阶位移放大系数; ω_{nj} 为结构第 j 振型自振频率, ξ_{dj} 为高效耗能黏弹性阻尼器第 j 振型附加阻尼比, ξ 为结构本身阻尼比。

式(49)代入式(48), 可得

$$\bar{c}_j = \sum_{s=1}^N (C_j^*(\omega_s) \omega_s A_s \bar{R}_{js}^2) / \left(\sum_{s=1}^N (\omega_s A_s^2 \bar{R}_{js}^2) \right) \quad (51)$$

$$\xi_{dj} = \bar{c}_j / \left(2\omega_{nj} \sum_{i=1}^n (\varphi_{ij}^2 M_i) \right) \quad (52)$$

式中 M_i 为第 i 楼层质量, n 为楼层总数。

解方程 $\bar{C}_j^*(\omega) = \bar{c}_j$, 可得方程解 $\omega = \omega_c$, 代入式(33)可计算 $[R\cos^2\Psi\cdot K_d^*(\omega_c)]$ 。

结构只考虑第 j 振型, 可得

$$\bar{k}_j = \{\varphi_j\}^T [R\cos^2\Psi\cdot K_d^*(\omega_c)]\{\varphi_j\} \quad (53)$$

第 j 振型地震作用结构振动方程为

$$\bar{M}_j \ddot{q}_j + \bar{C}_j \dot{q}_j + \bar{K}_j q_j + \bar{k}_j q_j + \bar{c}_j \dot{q}_j = -\{\varphi_j\}^T [M]\{1\} \ddot{x}_g \quad (54)$$

式中 \bar{M}_j, \bar{C}_j 和 \bar{K}_j 分别为结构第 j 阶广义质量、广义阻尼系数和广义刚度。

式(54)傅里叶变换, 可得

$$|Q_j|_{\max} = \frac{\{\varphi_j\}^T [M]\{1\} A_{\max}}{\sqrt{(\bar{K}_j + \bar{k}_j - \omega^2 \bar{M}_j)^2 + \omega^2 (\bar{C}_j + \bar{c}_j)^2}} \quad (55)$$

式中 A_{\max} 为地震加速度幅值, Q_j 为 q_j 的傅里叶变换。

若结构振动方程不考虑 \bar{k}_j , 仅考虑阻尼 \bar{c}_j 时, 将结构振动方程写为

$$\bar{M}_j \ddot{q}_{j0} + \bar{C}_j \dot{q}_{j0} + \bar{K}_j q_{j0} + \bar{c}_j \dot{q}_{j0} = -\{\varphi_j\}^T [M] \{1\} \ddot{x}_g \quad (56)$$

同理

$$|Q_{j0}|_{\max} = \frac{\{\varphi_j\}^T [M] \{1\} A_{\max}}{\sqrt{(\bar{K}_j - \omega^2 \bar{M}_j)^2 + \omega^2 (\bar{C}_j + \bar{c}_j)^2}} \quad (57)$$

由式(55,57)可得

$$|Q_j|_{\max} = \frac{\sqrt{\bar{K}_j - \omega^2 \bar{M}_j)^2 + \omega^2 (\bar{C}_j + \bar{c}_j)^2}}{\sqrt{\bar{K}_j + \bar{k}_j - \omega^2 \bar{M}_j)^2 + \omega^2 (\bar{C}_j + \bar{c}_j)^2}} |Q_{j0}|_{\max} \quad (58)$$

$$|Q_j|_{\max} = \frac{\sqrt{(\omega_{nj}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (\bar{C}_j / \bar{M}_j + \bar{c}_j / \bar{M}_j)^2}}}{\sqrt{(\omega_{nj}^2 + \omega_{dj}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (\bar{C}_j / \bar{M}_j + \bar{c}_j / \bar{M}_j)^2}} |Q_{j0}|_{\max} \quad (59)$$

$$\omega_{nj} = \sqrt{\bar{K}_j / \sum_{i=1}^n (\varphi_{ij}^2 M_i)} \quad (60)$$

$$\omega_{dj} = \sqrt{\bar{k}_j / \sum_{i=1}^n (\varphi_{ij}^2 M_i)} \quad (61)$$

当结构考虑 \bar{k}_j 和 \bar{c}_j 的阻尼力为

$$\bar{f}_j = \bar{c}_j \dot{q}_j \quad (62)$$

式(62)傅里叶变换, 可得

$$|\bar{F}_j| = \omega \bar{c}_j |Q_j| \quad (63)$$

$$|\bar{F}_j|_{\max} = \omega \bar{c}_j \frac{\sqrt{(\omega_{nj}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (\bar{C}_j / \bar{M}_j + \bar{c}_j / \bar{M}_j)^2}}}{\sqrt{(\omega_{nj}^2 + \omega_{dj}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (\bar{C}_j / \bar{M}_j + \bar{c}_j / \bar{M}_j)^2}} \quad (64)$$

若结构不考虑 \bar{k}_j , 仅考虑 \bar{c}_j 时阻尼力表示为

$$\bar{f}_j = \bar{c}_{j,eq} \dot{q}_{j0} \quad (65)$$

式中 $\bar{c}_{j,eq}$ 为结构第 j 振型等效阻尼系数。

同理, 可得

$$|\bar{F}_j|_{\max} = \omega \bar{c}_{j,eq} |Q_{j0}|_{\max} \quad (66)$$

比较式(64,66)可得

$$\bar{c}_{j,eq} = \bar{c}_j \frac{\sqrt{(\omega_{nj}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (2\xi\omega_{nj} + \bar{c}_j / \bar{M}_j)^2}}}{\sqrt{(\omega_{nj}^2 + \omega_{dj}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (2\xi\omega_{nj} + \bar{c}_j / \bar{M}_j)^2}} \quad (67)$$

近似取 $\omega = \omega_{nj}$, 得结构第 j 振型等效阻尼比 $\xi_{j,eq}$ 为

$$\xi_{j,eq} = \frac{\bar{c}_j}{2\bar{M}_j \sqrt{\omega_{nj}^2 + \omega_{dj}^2}} \cdot \frac{2\xi + \bar{c}_j / (\omega_{nj} \bar{M}_j)}{\sqrt{(\omega_{dj} / \omega_{nj})^4 + [2\xi + \bar{c}_j / (\omega_{nj} \bar{M}_j)]^2}} \quad (68)$$

当结构仅考虑第一振型时, 取 $j = 1$ 。

3 算例分析

框架结构楼层如图 6 所示, 共有 10 个楼层, 其

首层高 4.5 m, 首层以上层高均为 3.3 m, 结构总高度为 34.2 m, 两边跨跨度 6.6 m, 中跨跨度 3 m; 该结构为 8 度设防烈度(基本地震加速度 0.3 g), 丙类设防, 设计地震分组为第 2 组; 结构采用 C30 混凝土; 各层楼和屋面恒载标准值包括墙体自重折算为 66 kN/m, 各层楼和屋面取活载标准值 13.2 kN/m; 设计框架梁截面高 650 mm, 宽 300 mm, 设计框架柱截面高 750 mm, 宽 600 mm。根据《建筑结构抗震规范》取地震最大加速度为 110 cm/s²。

图 6(a)中框架结构各楼层设置传统黏弹性阻尼器; 于每个楼层沿对角设置本文提出的高效耗能黏弹性阻尼器, 如图 6(b)所示。图 6(a)中各阻尼系数分别取图 6(b)中对应楼层黏弹性阻尼器的相应值放大 R 倍($R = 4$), 但松弛时间系数 η 不变。

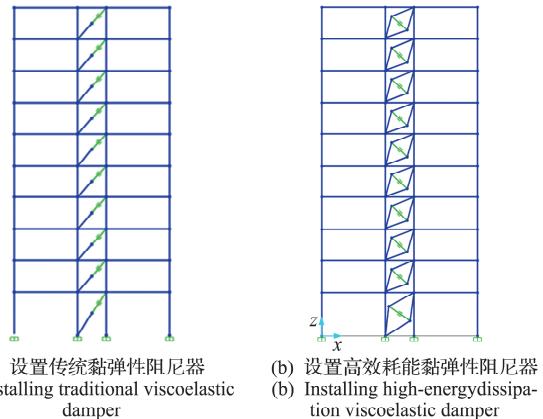


图 6 结构简图
Fig. 6 Sketch of structure

3.1 阻尼器布置方式对阻尼放大系数的影响

当阻尼器沿楼层对角布置且与楼面夹角为 Ψ 时, 其阻尼力 f 为

$$f = C \cdot u \cdot \cos \Psi \quad (69)$$

式中 u 和 Ψ 分别为楼层的层间位移以及阻尼器与楼面夹角, 如图 2 所示; C 为阻尼器沿楼层对角布置时的阻尼系数。

当阻尼器沿楼层水平方向布置时, 阻尼器的阻尼力 \bar{f} 为

$$\bar{f} = \bar{C} \cdot u \quad (70)$$

式中 \bar{C} 为阻尼器水平布置时的阻尼系数。

若阻尼器上述两种布置方式在水平方向产生的阻尼力相等, 则

$$f \cdot \cos \Psi = \bar{f} \quad (71)$$

将式(69,70)代入式(71), 化简得

$$\bar{C} = C \cdot \cos^2 \Psi \quad (72)$$

3.2 高效耗能黏弹性阻尼器与传统黏弹性

阻尼器减震效果对比

针对三类场地, 本文分别选取 25 条地震波进

行分析,结果表明,同类场地的地震波分析规律基本一致,限于论文篇幅,本文选取以下三条地震波,列入表1。

表 1 地震波的选取

Tab. 1 Selection of seismic wave

名称	场地类型	时间间隔/s	持时/s	峰值/Gal
CPM_CAPE	I类	0.02	60.00	1019.40
MENDOCINO_90				
El-Centro 波	II类	0.02	30.02	341.7
CPC_TOPANGA	III类	0.02	55.58	380.98
CANYON_16_nor				

限于论文篇幅,本文仅给出II类场地El-Centro波分析结果,其他两类场地地震波分析结果和El-Centro波类似。

分析时将地震波加速度幅值调整为 110 cm/s^2 ,其他时刻加速度按照比例进行调整。

将各楼层按图6(b)设置高效耗能黏弹性阻尼器 $l_0/l_1=2$,小震作用下,其阻尼放大系数 $R=4$,将各楼层斜向布置阻尼器的阻尼系数 C 按式(72)换算为 \bar{C} ,换算后各楼层 \bar{C} 相同。

对图6分别采用SAP2000软件进行时程分析,可得结构各楼层层间最大位移角,如图7所示。可以看出,高效耗能黏弹性阻尼器对结构各楼层层间最大位移角有明显的减震效果,且减震效果与阻尼系数放大 R 倍的传统黏弹性阻尼器基本相同。

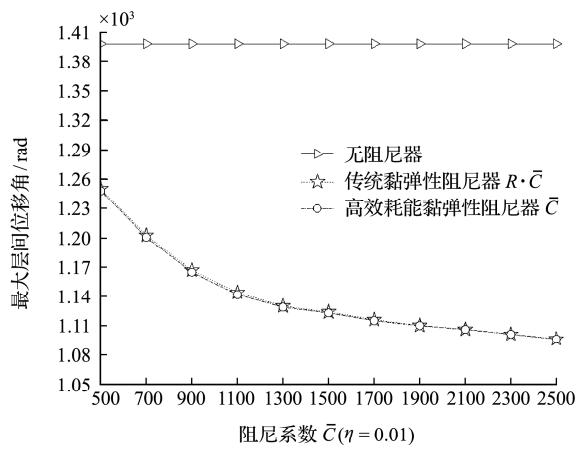


Fig. 7 Maximum interlayer displacement angle

3.3 等效阻尼分析

在图6(b)所示框架结构中设置高效耗能黏弹性阻尼器。考虑楼层高差别,底部楼层阻尼器的阻尼系数 $C_{d,1}=9820\text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,其他楼层 $C_d=5968\text{ kN}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,各阻尼器的松弛时间系数取 $\eta=0.01$,小震作用各高效耗能黏弹性阻尼器的阻尼放大系数 $R=4$ 。

根据式(68)计算结构在三类场地地震波作用

下的等效阻尼比,列入表2。在此基础上,在阻尼等效前后,分别对三类场地地震波作用的框架结构进行时程分析。限于篇幅,图8给出El-Centro波作用下结构顶部的位移时程曲线。

表 2 结构等效阻尼比

Tab. 2 Equivalent damping ratio of structure

场地类别	I类	II类	III类
结构等效阻尼比	0.2332	0.2355	0.2364

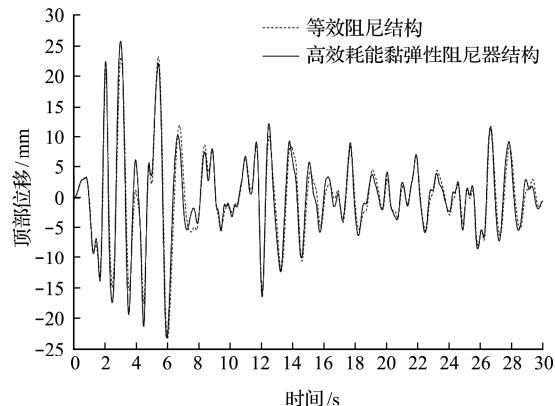


Fig. 8 Time history curve of top layer displacement of the structure

可以看出,等效阻尼框架结构与设置高效耗能黏弹性阻尼器框架结构在地震波作用下的顶层位移时程曲线比较接近,且误差不超过10%,表明本文计算的等效阻尼比可以满足工程要求。

4 结 论

(1) 高效耗能黏弹性阻尼器只要有足够的安装空间使 l_0 满足式(21),就能放大黏弹性阻尼器的阻尼,且小震作用下将阻尼放大 $R=(l_0/l_1)^2$ 倍,大震及巨震作用下将阻尼至少放大 \bar{R} 倍。

(2) 设置高效耗能黏弹性阻尼器框架结构与设置阻尼系数放大 R 倍的传统黏弹性阻尼器的框架结构相比,层间最大位移角曲线几乎重合,且较无阻尼器结构,层间最大位移角减少20%~30%以上。

(3) 本文给出了设置高效耗能黏弹性阻尼器结构等效阻尼比,按该值对本文结构顶部位移分析,表明阻尼等效前后的分析结果偏差不超过10%,可以满足工程要求。

参考文献(References):

- [1] 刘军生,杨佳玲,陈建慧.黏弹性阻尼器在工程应用中的震动控制理论及分析[J].建筑结构,2011,41(S1): 187-190. (LIU Jun-sheng, YANG Jia-ling, CHEN

- Jian-hui. Vibration control theory and analysis of viscoelastic damper in engineering application [J]. *Building Structure*, 2011, **41**(S1): 187-190. (in Chinese))
- [2] 张敏, 庞华英. 设置黏弹性阻尼耗能框架结构减震性能分析 [J]. *计算力学学报*, 2019, **36**(6): 739-746. (ZHANG Min, PANG Hua-ying. Damping performance analysis of energy dissipation frame structure with viscoelastic damper [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2019, **36**(6): 739-746. (in Chinese))
- [3] 张敏, 庞华英. 带支撑黏弹性阻尼器框架减震性能分析 [J]. *应用力学学报*, 2020, **37**(1): 418-426, 97-98. (ZHANG Min, PANG Hua-ying. Damping performance analysis of frame structure installing viscoelastic damper with support [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2020, **37**(1): 418-426, 497-498. (in Chinese))
- [4] 张敏, 付熊, 陈钰雪, 等. 设置黏弹性阻尼器耗能框架结构随机振动分析 [J]. *应用力学学报*, 2021, **38**(5): 2137-246. (ZHANG Min, FU Xiong, CHEN Yuxue, et al. Random vibration analysis of energy dissipation frame structure installing viscoelastic dampers with supports [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, **38**(1): 37-45. (in Chinese))
- [5] 张敏, 付熊, 陈钰雪, 等. 带支撑黏弹性阻尼器耗能框架结构随机振动分析 [J]. *计算力学学报*, 2021, **38**(1): 37-45. (ZHANG Min, FU Xiong, CHEN Yuxue, et al. Random vibration analysis of energy dissipation frame structure installing viscoelastic dampers with supports [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, **38**(1): 37-45. (in Chinese))
- [6] 邹万杰, 马金凤, 李创第, 等. 一般黏弹性阻尼减震结构的随机响应分析 [J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2018, **43**(5): 1885-1894. (ZOU Wan-jie, MA Jin-feng, LI Chuang-di, et al. Random response analysis of general viscoelastic damping structures [J]. *Journal of Guangxi University(Natural Science Edition)*, 2018, **43**(5): 1885-1894. (in Chinese))
- [7] Kim J, Ryu J, Chung L. Seismic performance of structures connected by viscoelastic dampers [J]. *Engineering Structures*, 2006, **28**(2): 183-195.
- [8] Tchamo J M, Zhou Y. An alternative practical design method for structures with viscoelastic dampers [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2018, **17**(3): 459-473.
- [9] Pawlak Z, Lewandowski R. The continuation method for the eigenvalue problem of structures with viscoelastic dampers [J]. *Computers & Structures*, 2013, **125**: 53-61.
- [10] 贾九红, 沈小要, 杜俭业, 等. 黏弹性阻尼器的力学特性分析 [J]. *振动与冲击*, 2007(10): 101-103, 91. (JIA Jiu-hong, SHEN Xiao-yao, DU Jian-ye, et al. Mechanical analysis of a visco-elastic damper [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, **26**(10): 101-103, 191. (in Chinese))
- [11] 杨巧荣, 孔令祥, 郭彦, 等. 位移放大型油阻尼器减震结构减震效应分析 [J]. *地震工程与工程振动*, 2017, **37**(1): 48-55. (YANG Qiao-rong, KONG Ling-xiang, GUO Yan, et al. Vibration reduction effect analysis of building structure equipped with displacement amplification oil damper [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2017, **37**(1): 48-55. (in Chinese))
- [12] 周云, 林绍明, 邓雪松, 等. 设置悬臂肘节型黏滞阻尼器高层结构的减震效果分析 [J]. *工程抗震与加固改造*, 2014, **36**(2): 8-14. (ZHOU Yun, LIN Shao-ming, DENG Xue-song, et al. Analysis of seismic mitigation effect on high-rise building with cantilever-toggle-brace viscous dampers [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2014, **36**(2): 8-14. (in Chinese))
- [13] 邓宗才, 刘春国, 王力. 剪刀型 SMA 阻尼器在钢结构减震中的应用 [J]. *北京工业大学学报*, 2009, **35**(1): 42-47. (DENG Zong-cai, LIU Chun-guo, WANG Li. Seismic response control for steel structure using shape memory alloy damper [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2009, **35**(1): 42-47. (in Chinese))
- [14] 李创第, 葛新广, 陆运军. 黏滞和黏弹性阻尼器减震结构的等效阻尼 [J]. *应用力学学报*, 2011, **28**(4): 328-333, 447. (LI Chuang-di, GE Xin-guang, LU Yun-jun. Equivalent damping of dissipation structures with viscous and viscoelastic dampers [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2011, **28**(4): 328-333, 447. (in Chinese))
- [15] 李创第, 葛新广, 陆运军. 黏滞和黏弹性阻尼器减震结构的随机响应特性 [J]. *应用力学学报*, 2011, **28**(3): 219-225, 323. (LI Chuang-di, GE Xin-guang, LU Yun-jun. Random response characteristics of dissipation structures with viscous and viscoelastic dampers [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2011, **28**(3): 219-225, 323. (in Chinese))
- [16] 沈聚敏, 周锡元, 高小旺, 等. *抗震工程学* [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. (SHEN Ju-min, ZHOU Xi-yuan, GAO Xiao-wang, et al. *Seismic Engineering* [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2000. (in Chinese))
- [17] 周云. 耗能减震加固技术与设计方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. (ZHOU Yun. *Seismic Strengthening Technology and Design Method of Energy Dissipation and Shock Absorption* [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))

Accurate oil supply design and analysis of attitude control flywheel bearing oil feeder

LIU Yu-hao, WU Hong-kai, ZHANG Yu-xiang, WU Cheng-wei*

(State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment,

Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: An attitude-control flywheel bearing-rotor system is an important control component of flight attitude of space vehicles, which imposes strict requirements for bearing lubrication accuracy and oil supply reliability. Based on the reverse design principle of solid clearance seals, this paper designs a miniature oil supplier that automatically adjusts the oil supply rate by centrifugal force, making full use of the space between the two bearings, with simple structure and high reliability. The theoretical analysis model of fluid-structure interaction of oil supply rate is established. Based on this model a semi-analytical solution of the oil supply rate is obtained, and the influence of the geometric parameters of the interference contact surface of the oil supplier on the oil supply rate is studied. It is found that the oil supply rate and oil supply amount can be accurately controlled by optimizing the geometric size, surface roughness and interference coordination pressure of the interference coordination gap, and the oil supply rate is proportional to the cubic and circumferential length of the nominal gap of the interference contact interface, and is inversely proportional to the viscosity of the lubricating oil and the axial width of the contact surface. The oil supply rate is proportional to the square of the bearing speed, so that the bearing can automatically get enough lubricating oil when running at high speed. This technology can be applied to the precision attitude control flywheel system of spacecraft and the fuel supply design of various other precision bearing rotor systems.

Key words: vehicles; bearings; oil feeder; attitude control flywheel

(上接第 444 页)

Analysis of damping performance of the frame structure with high-efficiency energy dissipation viscoelastic dampers

ZHANG Min^{*1,2}, SHU Lei-xing²

(1. School of Civil Engineering, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang 330038, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiao Tong University, Nanchang 330038, China)

Abstract: A high-efficiency energy dissipation viscoelastic damper (HEVD) is proposed, and the seismic performance of a frame structure with a HEVD is studied. Firstly, the construction of the viscoelastic damper with high efficiency energy dissipation is presented, the formulas for calculating the damping magnification factor under small, large and giant earthquakes are derived, and the variation law of the magnification factor is analyzed. In addition, the equivalent damping ratio of the frame structure with the HEVD is derived. The analysis shows that the difference of the time-history curve of the top displacement of the frame structure before and after the damping equivalence is not more than 10%.

Key words: frame; damp; high-efficiency; damping; viscoelasticity; equivalence; magnification