

减震结构多目标性能曲线的设计及应用

杜东升^{1†} 张云龙¹ 李威威¹ 万卓明¹ 金骥²

(1.南京工业大学 土木工程学院,南京 211816)(2.上海交通大学 后勤保障中心,上海 200240)

摘要 减震性能曲线用于调整阻尼比不同于结构固有阻尼比时的地震响应,它对减震结构的简化设计与分析具有重要意义.本文首先推导出了单质点体系在简谐激励位移减震率 η_d 与加速度减震率 η_a 的解析表达式,分析表明在各种激励频率下, η_d 随阻尼比增大而减小,但 η_a 在一定激励频率范围会出现随阻尼比增大、再减小,而后又增大的现象.该现象可以揭示为何有些地震激励下减震结构的加速度和地震剪力会增大的现象;减震率在共振点处取得最小值,且结构自振周期值离共振点越近减震率越小,即增加阻尼比对结构的减效果就越好;在解析解结果的基础对地震波的减震性能曲线进行分析,并设计出了双目标的性能曲线函数.最后,利用算例验证了所得性能曲线在实际工程应用中的可行性和准确性.

关键词 性能曲线, 减震率, 解析解, 地震波, 时程分析

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-060

引言

在地震作用下,阻尼器对结构的减震效果可用配置阻尼器的减震结构与原结构的地震反应之比 η 来表示^[1].该无量纲参数 η 称为地震反应的减震率,为方便起见,将不同阻尼比相对于基础阻尼比的减震率绘制成的参考曲线称为结构的减震性能曲线^[2].性能曲线对减震结构、隔震结构的设计与分析具有重要意义.其中较为重要的两个减震率参数为位移减震率 η_d 和加速度减震率 η_a ,他们的定义如下:

$$\eta_d(\xi) = \frac{d_{\max}(\xi)}{d_{\max}(\xi = 0.05)} \quad (1)$$

式中, $d_{\max}(\xi)$ 是结构阻尼比为 ξ 时的位移响应幅值, $d_{\max}(\xi=0.05)$ 是结构阻尼比为 0.05 时的位移响应幅值.

$$\eta_a(\xi) = \frac{a_{\max}(\xi)}{a_{\max}(\xi = 0.05)} \quad (2)$$

式中, $a_{\max}(\xi)$ 是结构阻尼比为 ξ 时的加速度响应幅值, $a_{\max}(\xi=0.05)$ 是结构阻尼比为 0.05 时的加速度响应幅值.

由以上公式可以看出,减震率 η 可用来表示具体阻尼比对结构地震反应的修正情况,减震率 η 越

小时,意味着当前阻尼对结构的减震效果越好,所以人们经常根据结构所需的性能水准和性能目标,通过 η 值来确定结构所需的阻尼比.

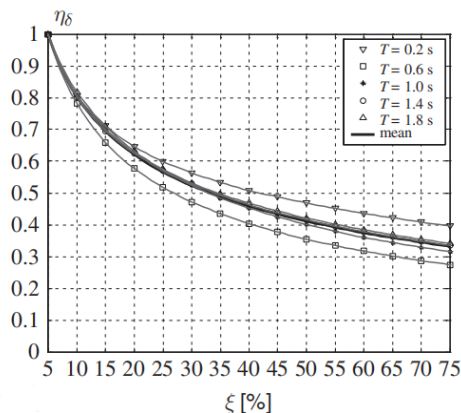
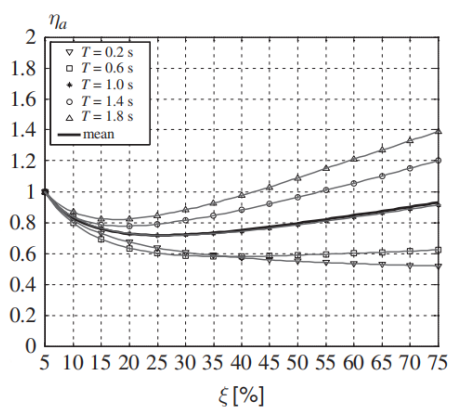
目前国内外有很多对减震率及性能曲线的相关研究^[3-10],但对不同自振周期下消能减震结构性能曲线数值变化规律的详细研究却很少.图 1 为文献[11]中所给出的单质点体系在不同自振周期下的性能曲线参考图,其中,图 1a 为位移性能曲线 $\xi-\eta_d$ 关系图,图 1b 为加速度性能曲线 $\xi-\eta_a$ 关系图,可以看出,在图 1a 中,位移减震率 η_d 总是随着阻尼比 ξ 的增大而减小;但在图 1b 中,在结构自振周期值较大的情况下,会出现加速度减震率 η_a 随着阻尼比 ξ 的增大呈先减小再增大的趋势.

一般认为,随着阻尼比的增加,结构的动力响应会相应减小,但大量研究却表明:位移响应确实会随阻尼比的增加而减小,但加速度响应在大多数地震作用下会出现随阻尼比的增加呈现先减小后增大的规律,目前尚未有相关文献讨论其机理.

本文主要针对这一问题进行深入探讨,通过对单质点体系简谐波激励下减震性能曲线的研究,推导不同自振周期下位移与加速度减震率的解析解公式,作出相关性能曲线,并以该解析结果为基础对实际地震波进行分析,以此说明减震结构地震反

2019-08-25 收到第 1 稿,2020-01-10 收到修改稿.

† 通讯作者 E-mail: ddshy@163.com

(a)位移性能曲线 ξ - η_d (a) ξ - η_d performance curve of displacement(b)加速度性能曲线 ξ - η_a (b) ξ - η_a performance curve of acceleration图1 文献中的性能曲线 ξ - η 关系图Fig.1 ξ - η performance curve of literature

应的一些规律及其理论原因。

1 单质点体系简谐波激励下的减震率公式推导

在单质点体系(弹性)输入简谐波激励的情况下,根据结构动力学知识,可用“位移反应系数 R_d ”来推导位移减震率 η_d , R_d 定义如下:

$$R_d = \frac{u_0}{(u_{st})_0} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} \quad (3)$$

其中, R_d 是位移反应系数, u_0 是动位移幅值, $(u_{st})_0$ 是静位移幅值, ξ 是阻尼比, ω 是激励频率, ω_n 是结构的固有频率. 则位移性能曲线参数 η_d 可用下式推导出:

$$\eta_d = \frac{R_d(\xi)}{R_d(\xi = 0.05)} \quad (4)$$

同样,选用“谐振激励的传递率 TR 理论”公式来推导加速度性能曲线参数 η_a , 其定义如下:

$$R_a = TR = \frac{\ddot{u}'_0}{\ddot{u}_{g0}} = \frac{\left\{ \frac{1 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2} \right\}^{1/2}} \quad (5)$$

其中, \ddot{u}'_0 是到质量的加速度, \ddot{u}_{g0} 是地面加速度的幅值. 则加速度性能曲线参数 η_a 可用下式推导出:

$$\eta_a = \frac{TR(\xi)}{TR(\xi = 0.05)} \quad (6)$$

2 单质点体系减震性能曲线

2.1 简谐波激励下的性能曲线

假设一单质点体系,根据公式 3~5 作出不同 ω/ω_n 下阻尼比 ξ 与性能曲线参数 η 的关系图,其中阻尼比的范围为 0.05~0.75;由公式(5)可以看出,当 $\omega/\omega_n < \sqrt{2}$ 时,无论何种阻尼比下 $R_a > 1$;当 $\omega/\omega_n > \sqrt{2}$ 时,无论何种阻尼比下 $R_a < 1$; $\omega/\omega_n = 1$ 代表共振的情况,则可大致将 $\omega/\omega_n < 1$ 的部分(虚线)视为相对低频激励下的关系曲线,将 $1 < \omega/\omega_n < \sqrt{2}$ 的部分(点线)视为相对中频激励下的关系曲线,将 $\omega/\omega_n > \sqrt{2}$ 的部分(点划线)视为相对高频激励下的关系曲线, $\omega/\omega_n = 1$ (实线)为共振点处的关系曲线,具体结果见图 2.

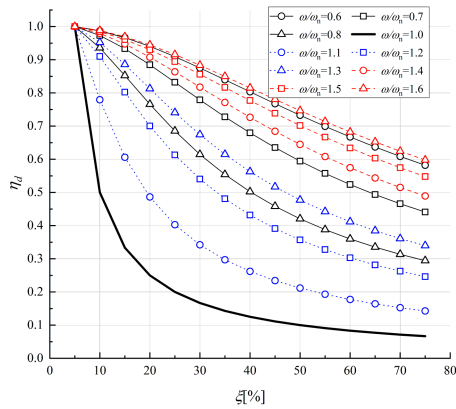
由图 2a 的位移性能曲线可以得出以下结论:

(1)无论在何种自振周期下,位移减震率随阻尼比的增加而减小;(2)随着阻尼比的增加,位移减震率的减小幅度会越来越小;(3)频率比值离共振点 ($\omega/\omega_n = 1$) 越近的,位移减震率越小.

同样,由图 2b 的加速度性能曲线可以得出以下结论:(1)在低频激励下,加速度减震率同样会随阻尼比的增加而减小,且其减小幅度也会越来越小;(2)随着激励频率的增加,加速度减震率反而会随着阻尼比的增加而增加,经前文推导,其界限为 $\omega/\omega_n = \sqrt{2}$;(3)频率比值离共振点越近的,加速度减震率越小.

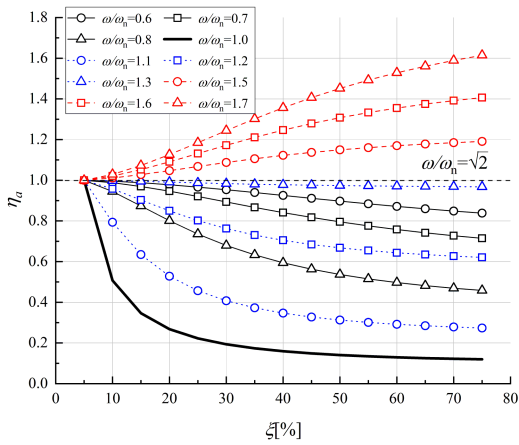
2.2 共振点减震率公式

由上节可知,单质点体系无论处于何种自振周期下,其自振周期值离共振点越近,减震率就会越小,即增加阻尼比对体系动力反应的降低效果就越好.因此,可将 $\omega/\omega_n = 1$ 带入公式 3~6,得出共振点处



(a)位移性能曲线图

(a) Performance curve of displacement



(b)加速度性能曲线图

(b) Performance curve of acceleration

图2 单质点体系简谐激励下性能曲线图

Fig.2 Performance curve of SDOF system under harmonic excitation

的位移及加速度减震率公式(7)和(8):

$$\eta_d = \frac{1}{20\xi} \tag{7}$$

$$\eta_a = \sqrt{\frac{1}{101} \left(1 + \frac{1}{4\xi^2} \right)} \tag{8}$$

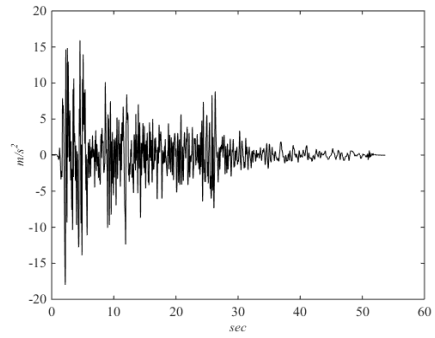
该结果对于增加阻尼器的使用效率及减震设计中的选波等工程问题具一定有指导意义.

2.3 特定地震波下的性能曲线

通过傅里叶变换将一条地震波分解成若干条简谐波,然后可以根据上一节的方法得到每条简谐波的减震率,通过合成就可以得到单质点体系特定地震波的性能曲线.

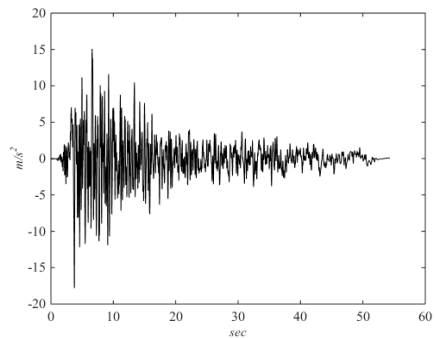
以三条著名地震波“El Centro-1940 NS”、“Taft-1952 EW”、“Kobe-1995 NS”为例,它们的加速度时程曲线如图3所示:

在确定阻尼比下,由傅里叶变换所得的每条简



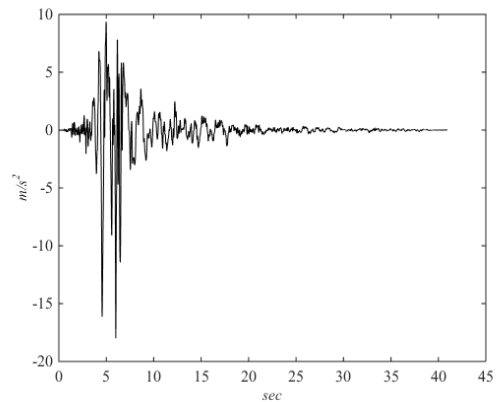
(a)El Centro波

(a) El Centro wave



(b)Taft波

(b) Taft wave



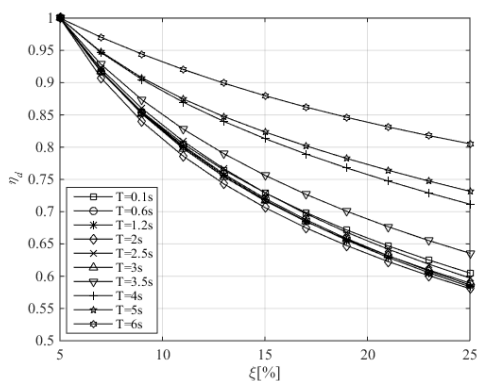
(c)Kobe波

(c) Kobe wave

图3 地震波加速度时程曲线

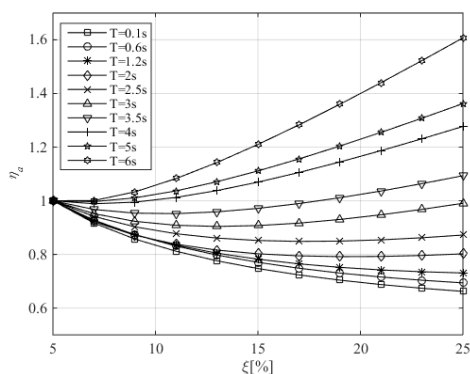
Fig.3 Ground motion acceleration

谐波都可根据公式(3)和公式(5)得出 R_d 与 R_a 值,在地震波持续时间中的各个时间点 t ,将所有简谐波的 R_d 与 R_a 值按各简谐波的 $A_n \cos(\omega_n t + \varphi_n)$ 值取加权平均,取其中最大值,再结合公式(4)和公式(6)得出该地震波的减震率 η_d 与 η_a 值.以此为基础,最终得出的三条地震波的性能曲线如图4~6所示,由于在实际工程中,建筑结构的阻尼比一般较小,所以图中给出的阻尼比范围不超过25%.



(a)位移性能曲线图

(a)Performance curve of displacement



(b)加速度性能曲线图

(b)Performance curve of acceleration

图4 单质点体系El Centro波性能曲线图

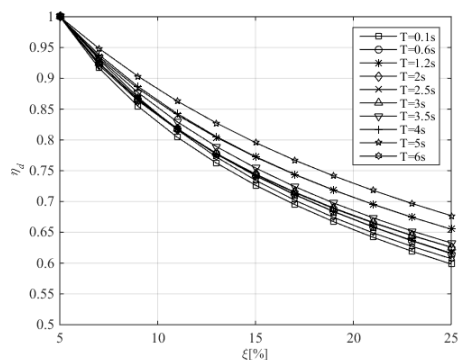
Fig.4 Performance curve of SDOF system under El Centro wave

从图4~6中可以看出,得出的各条地震波性能曲线规律与图1基本类似,由此可以得出以下结论:(1)各条地震波的位移减震率随阻尼比增加而减小,且其减小幅度会越来越小,这与简谐波激励下的规律相同;(2)各条地震波的加速度减震率对部分周期的结构会随着阻尼比的增加而减小,但对于部分周期的结构会随着阻尼比的增加而增加;(3)由于构成实际地震波的简谐波幅值及频率丰富,长自振周期体系会使简谐波激励周期与自振周期的比值 ω/ω_n 包含范围也较为丰富,所以其 η_a 值会随阻尼比的增大呈先减小后增大的趋势。

在实际工程问题中,可用该方法得出任意一条地震波的位移及加速度性能曲线图,从而能够在特定结构的抗震分析中以此为依据选取适用于该结构的地震波。

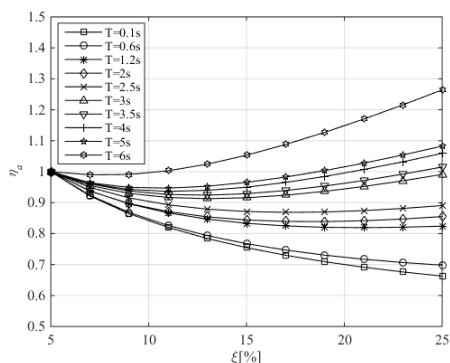
2.4 时程分析结果核对

通过时程分析的结果,对上述地震波信号分解重构的结果进行对比验证,计算取其中几个较为典型的自振周期值,对比结果具体见图7~9。从以上



(a)位移性能曲线图

(a)Performance curve of displacement



(b)加速度性能曲线图

(b)Performance curve of acceleration

图5 单质点体系Taft波性能曲线图

Fig.5 Performance curve of SDOF system under Taft wave

结果可以看出,解析解与时程分析所得结果相比更为平滑,但两者误差较小,在可接受范围之内。

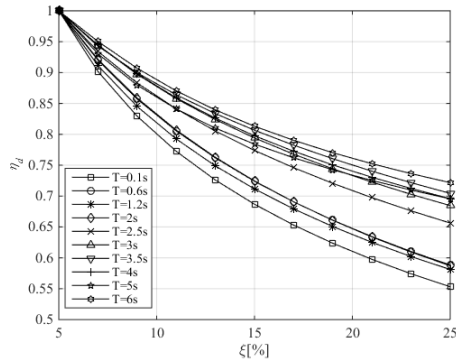
3 单质点体系多目标性能曲线

3.1 简谐激励下的多目标性能曲线

如前文所述,在减震设计中,可根据结构所需的性能水准和性能目标,通过性能曲线来确定结构所需的阻尼比,位移与加速度(剪力)又是比较重要的两个反应结构性能的参量。所以,在很多情况下,位移与加速度性能曲线要同时列入考虑的范围之内。

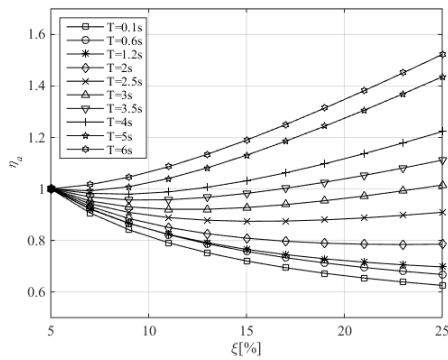
为解决综合考虑两种性能目标时及当两种性能目标出现矛盾时应如何抉择的问题,现将位移减震率及加速度减震率两个参数放入一张图中,在两种性能目标下得出不同阻尼比时,取较大的阻尼比即可,具体见图10:

图10在理论上得出了较大频率比及阻尼比范围下的性能曲线变化规律,但在实际工程问题中,我们则需要地震波激励下、小阻尼比范围内更为详



(a) 位移性能曲线图

(a) Performance curve of displacement



(b) 加速度性能曲线图

(b) Performance curve of acceleration

图 6 单质点体系 Kobe 波性能曲线图

Fig.6 Performance curve of SDOF system under Kobe wave

细的性能曲线参考图。

3.2 特定地震波激励下的多目标性能曲线

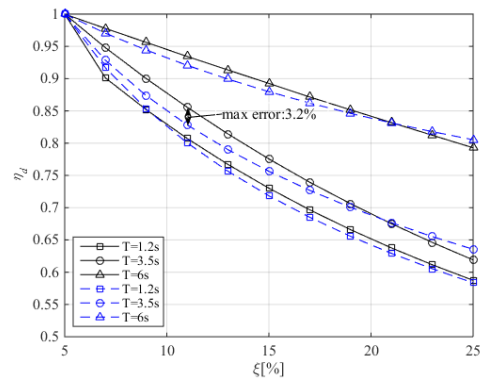
根据多目标性能曲线绘制方法,对单质点体系进行时程分析,输入三条地震波,将所得位移及加速度性减震率放入一张性能曲线图中,具体见图 11 所示,初始阻尼比均设为 2%:

以上得出的地震波多目标性能曲线图,可较为方便地直接用于特定地震波激励下的结构减震设计中。

4 算例分析

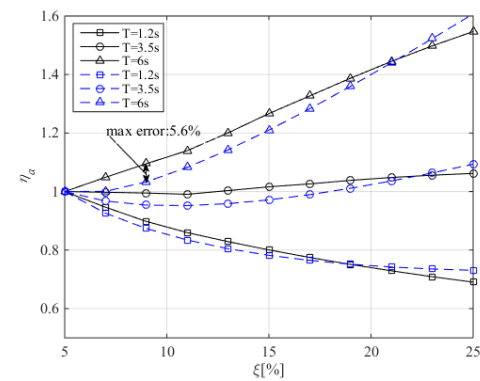
4.1 算例概况

6层剪切型建筑模型,如图 12 所示,采用商业有限元计算软件 sap2000 进行建模分析,在分析设置中选择“平面框架,XZ 平面”分析选项,以约束平面外的自由度;对梁刚度属性做放大修正使梁为无限刚梁,以 Link 单元模拟柱连接,以 Damper 模拟阻尼器连接.每层质量均设为 $m=80t$,层刚度均设为 $k=4.0 \times 10^7 N/m$;该结构无阻尼自振频率为 $\omega_1=5.39 rad/s$,整个结构嵌入地基。



(a) 位移性能曲线对比

(a) Comparison of performance curves of displacement



(b) 加速度性能曲线对比

(b) Comparison of performance curves of acceleration

图 7 El Centro 波解析解(虚线)与时程分析(实线)结果对比

Fig.7 Analytical solution comparison of El Centro wave (dashed line) and time history analysis (solid line)

4.2 算例减震设计及分析步骤

本次工作采用文献[1]中的五步法减震设计规程,以 Kobe 波为例说明具体步骤及验算结果。

4.2.1 第一步:确定结构所需的阻尼比

设位移与加速度性能目标为 $\eta_d=0.7$ 、 $\eta_a=0.7$,将结构等效为单质点体系后由公式 9~11 可得 $T=1.35s$,则由图 11c 中的性能曲线可得 $\xi \approx 15\%$,则取 $\bar{\xi}=15\%$ 。

$$M_i^* = \Phi_i^T M_s I \quad (9)$$

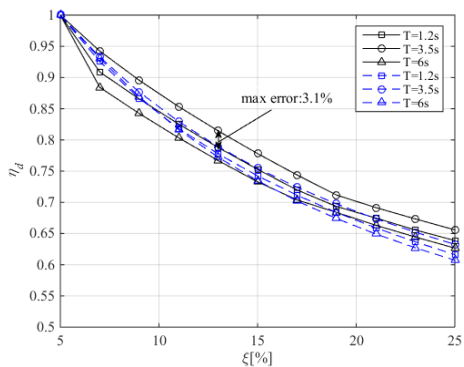
$$K_i^* = \Phi_i^T K_s \Phi_i \Gamma_i \quad (10)$$

$$\Gamma_i = \Phi_i^T M_s I / \Phi_i^T M_s \Phi_i \quad (11)$$

其中, M_i^* 、 K_i^* 是体系的单质点等效质量、等效刚度, Φ_i 是体系控制地震响应的第 i 阶阵型, M_s 是体系的质量矩阵, I 是单位矩阵, K_s 是体系的刚度矩阵, Γ_i 是结构第 i 阶阵型参与系数。

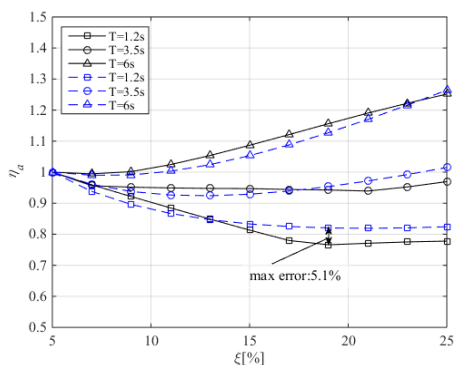
4.2.2 第二步:确定线性粘滞阻尼器的初始特性

楼层 $N=6$; 总质量 $m_{tot}=480t$; 自振频率 $\omega_1=$



(a)位移性能曲线对比

(a)Comparison of performance curves of displacement

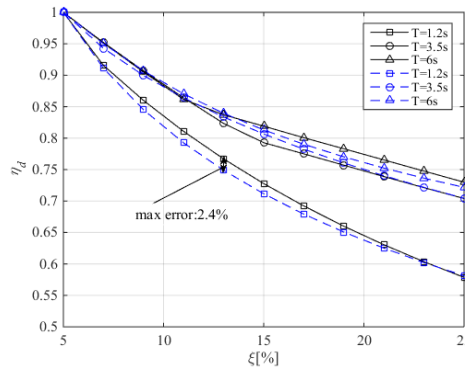


(b)加速度性能曲线对比

(b)Comparison of performance curves of acceleration

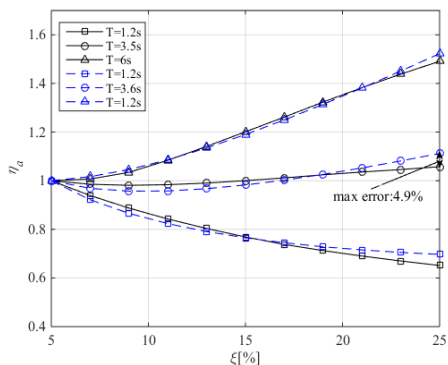
图8 Taft波解析解(虚线)与时程分析(实线)结果对比

Fig.8 Comparison of Taft wave analytical solution (dashed line) and time history analysis (solid line)



(a)位移性能曲线对比

(a)Comparison of performance curves of displacement



(b)加速度性能曲线对比

(b)Comparison of performance curves of acceleration

图9 Kobe波解析解(虚线)与时程分析(实线)结果对比

Fig.9 Analytical solution comparison of Kobe wave (dashed line) and time history analysis (solid line)

5.39rad/s; 阻尼器相对于轴线的水平倾斜角度 $\varphi = \arctan(3.5/6) = 30.24^\circ$ 。根据公式 12 计算得每层所需的阻尼系数之和为 $c_{storey} = 2165 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, 再由公式 13 计算得每层倾斜布置的阻尼系数之和

$$c_{storey, inclined} = 2900 \text{ kN} \cdot \text{s/m}.$$

$$c_{storey} = \bar{\xi} \cdot m_{tot} \cdot \omega_1 \cdot (N + 1) \quad (12)$$

$$c_{j, inclined} = c_j \cdot \left(\frac{1}{\cos^2 \phi} \right) \quad (13)$$

4.2.3 第三步:初步时程分析

根据第二步计算所得的计算结果对结构模型进行阻尼器的布置, 输入地震波进行时程分析, 得出各层阻尼器的最大速度为: $v_1 = 4.47 \text{ cm/s}$, $v_2 = 6.55 \text{ cm/s}$, $v_3 = 6.16 \text{ cm/s}$, $v_4 = 4.96 \text{ cm/s}$, $v_5 = 3.45 \text{ cm/s}$, $v_6 = 1.95 \text{ cm/s}$ 。

4.2.4 第四步:确定“等效”非线性粘滞阻尼器特性

假设 $\bar{\alpha} = 0.3$, $\chi = 0.8$, 根据公式 14 计算得每层非线性阻尼器的阻尼系数为: $c_{NL,1} = 292 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, $c_{NL,2} = 381 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, $c_{NL,3} = 365 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, $c_{NL,4} = 314 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, $c_{NL,5} =$

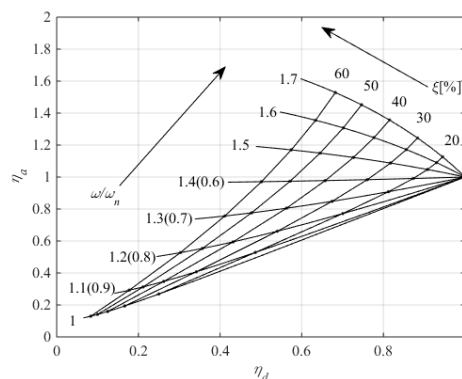


图10 简谐激励下多目标性能曲线图

Fig.10 Multi-objective performance curve under harmonic excitation

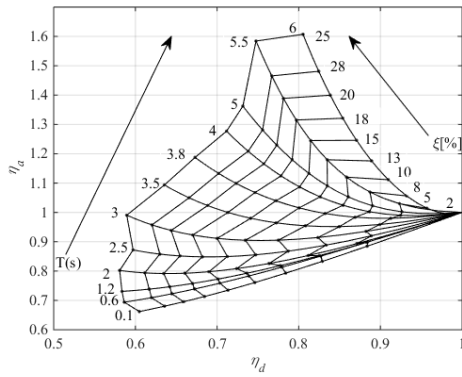
$244 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$, $c_{NL,6} = 163 \text{ kN} \cdot \text{s/m}$ 。根据公式 (15) 计算得 $k_{oil} \geq 1.61 \times 10^5 \text{ kN/m}$, 则假定 $\bar{k}_{oil} \geq 2 \times 10^5 \text{ kN/m}$ 。

$$\bar{c}_{NL} \cong \bar{c}_L \cdot (0.8 \cdot v_{max})^{1-\bar{\alpha}} \quad (14)$$

$$\bar{k}_{oil} \geq 10 \cdot \frac{\bar{c}_L \cdot v_{max}}{x_{max}} \cong 10 \cdot \bar{c}_L \cdot \omega_1 \quad (15)$$

4.2.5 第五步:最终时程分析结果

图 13~14 给出了最终时程分析的结果:



(a) El Centro 波下的多目标性能曲线图

(a) Multi-objective performance curve under El Centro wave

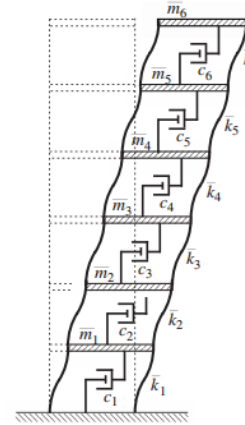
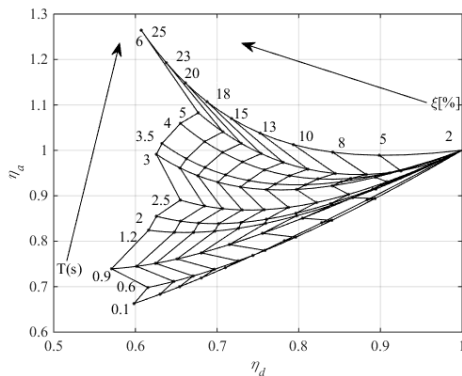


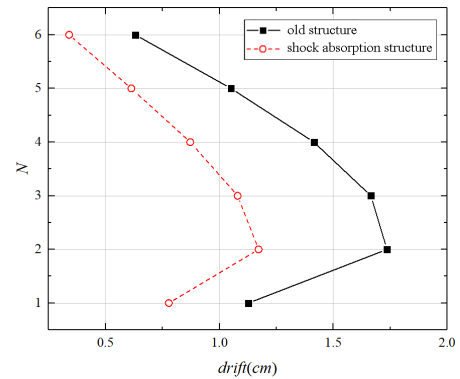
图 12 算例模型

Fig.12 Model used in numerical example



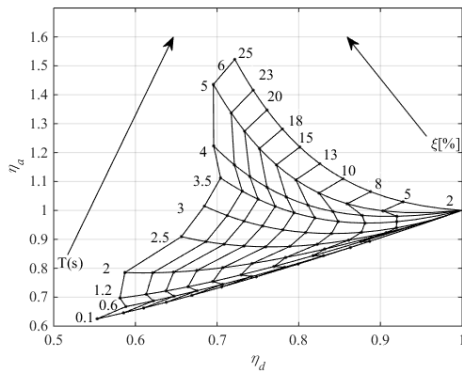
(b) Taft 波下的多目标性能曲线图

(b) Multi-objective performance curve under Taft wave



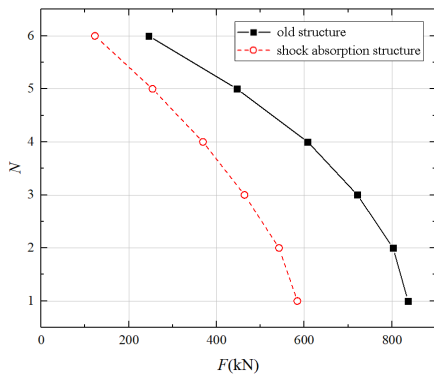
(a) 层间位移对比

(a) Comparison of displacements of different floors



(c) Kobe 波下的多目标性能曲线图

(c) Multi-objective performance curve under Kobe wave



(b) 层间剪力对比

(b) Comparison of shear forces of different floors

图 11 地震波激励下的多目标性能曲线图

Fig.11 Multi-objective performance curve under seismic wave excitation

图 13 减震设计前后各层地震响应对比

Fig.13 Comparison of seismic responses of different floors before and after seismic design

由以上结果可以看出,该算例输入kobe波时,结构位移和加速度(剪力)的性能目标基本上得到了满足,在较高楼层的减震率甚至远远超出了预期效果.

5 小结

本文通过简谐激励的分析结果可以得出以下三个重要的结论:

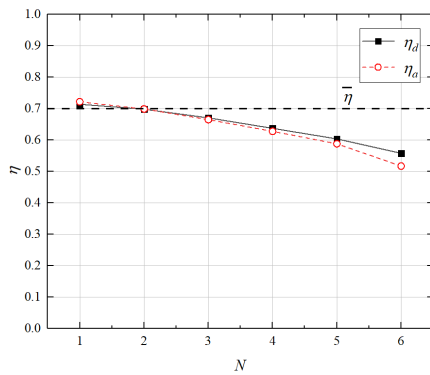


图14 减震设计各层性能目标

Fig.14 Performance objective of each layer under seismic design

(1)在减震结构设计中,持续增加结构的阻尼比,即配置更多的阻尼器,可以有效降低地震位移响应,对于不同的结构周期和激励周期比值下,配置更多的阻尼器反而还增加减震结构的加速度响应。

(2)在进行不同性能目标的减震设计时,可以利用本文提出的多目标性能曲线进行需求阻尼比的求解。

(3)通过多目标减震性能曲线可以看出,减震结构的位移减震率和加速度减震率是相关的,确定各自取值时应考虑两者之间的相互影响。

参 考 文 献

- 1 Lin Y Y, Chang K C. Study on damping reduction factor for buildings under earthquake ground motions. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(2): 206~214
- 2 Guo J W W, Christopoulos C. Performance spectra based method for the seismic design of structures equipped with passive supplemental damping systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2013, 42(6): 935~952
- 3 Cardone D, Dolce M, Rivelli M. Evaluation of reduction factors for high-damping design response spectra. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2009, 7(1): 273~291
- 4 徐阳. 基于性能曲线方法的被动耗能减震结构抗震分析与设计[硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2016 (Xu Y, Investigation on seismic analysis and design for structures with passive supplemental damping systems based on performance curves [Master Thesis], Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016(in Chinese))
- 5 梁兴文, 结构抗震性能设计理论与方法. 北京: 科学出版社, 2011 (Liang X W, Theory and method of seismic performance design of structures, Beijing: Science Press, 2011 (in Chinese))
- 6 Cardone D, Dolce M, Rivelli M. Evaluation of reduction factors for high-damping design response spectra. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2009, 7(1): 273~291
- 7 韩建平, 李晓松, 基于性能的非线性粘滞阻尼器减震结构设计分析. *建筑结构*, 2010(s2): 110~113 (Han J P, Li X S, Performance-based design and analysis of energy-dissipated structures with non-linear viscous dampers. *Journal of Building Structure*, 2010(s2), 110~113(in Chinese))
- 8 李恒, 吴建超, 雷霆. 地震动位移反应谱阻尼修正系数研究. *土木工程学报*, 2018, 51(7): 61~69, 86(Li H, Wu J C, Lei T. Damping modification factors for displacement response spectra. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(7): 61~69, 86(in Chinese))
- 9 韩建平, 陈军, 邹新磊. 基于性能的非线性黏滞阻尼器减震结构与抗倒塌能力评估. *建筑结构*, 2014, 44(4): 63~68, 29(Han J P, Chen J, Zhou X L. Performance-based seismic design and collapse resistance capacity evaluation for energy dissipation structures with nonlinear viscous dampers. *Journal of Building Structure*, 2014, 44(4): 63~68, 29(in Chinese))
- 10 王逸龙, 李晶, 赵雪梅. 基于优化设计的印制板组件精细化动力学建模方法. *动力学与控制学报*, 2017, 15(6): 518~524 (Wang Y L, Li J, Zhao X M. A refined approach for dynamic modeling of a printed circuit board assembly based on optimization design. *Journal of Dynamics and Control*, 2017, 15(6): 518~524 (in Chinese))
- 11 Priestley M J N. Myths and fallacies in earthquake engineering, revisited, Pavia: IUSS Press, 2003

DESIGN AND APPLICATION OF MULTI-OBJECTIVE PERFORMANCE CURVE OF STRUCTURES WITH ENERGY DISSIPATING DEVICES

Du Dongsheng^{1†} Zhang Yunlong¹ Li Weiwei¹ Wan Zhuoming¹ Jin Ji²
(1. College of Civil Engineering, Nanjing Technology University, Nanjing 211816, China)
(2. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Damping performance curve is used to adjust the seismic response of structures with damping ratio different from the natural damping ratio, which is of great significance to simplified design and analysis of the structures with energy dissipating devices. In this paper, two performance curve parameters, namely the displacement damping rate η_d and acceleration shock absorption rate η_a , of the SDOF system under harmonic excitation with different natural periods were calculated respectively. The results showed that the η_d decreases with the increase of damping ratio under any natural periods; η_a also decreases with the increase of damping ratio in a short natural period, but increases in a long natural period; Both coefficients reached the minimum value at the resonance point. Moreover, the damping ratio decreases as the natural period close to the resonance point. Based on the results of the analytical solution, comparison and analysis were conducted for several famous seismic waves and the corresponding shock absorption performance curve was obtained, which was verified with the results obtained from time history analysis. Since the frequency components of simple harmonic wave are manifold, η_a tended to increase with the decrease of the damping ratio, which can be used to explain the structural seismic response law and theoretical reasons of the high damping and long period. In the end, an example is presented to verify the feasibility of the performance curve in practical engineering.

Key words performance curve, decreasing amplitude ratio, analytical solution, seismic wave, time history analysis