

黏滞阻尼器考虑激励频率影响的附加阻尼比 简化计算

杜东升¹, 刘言杰¹, 徐庆阳²

(1. 南京工业大学土木工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 南京审计大学信息工程学院, 江苏 南京 211815)

摘要: 目前减震结构的附加阻尼比计算都需要先计算出结构的动力反应, 并进行复杂的迭代过程, 且在计算中一般都仅考虑激励频率等于结构基频的情况。基于非线性黏滞阻尼器, 提出了一种不需计算结构动力反应, 只根据结构特性、激励频率和阻尼器参数直接求解结构附加阻尼比的计算方法。分析了目前常用的几种附加阻尼比的计算方法, 推导出了减震体系在简谐激励下, 当激励频率等于结构基频时, 不需要计算结构动力反应, 且不需要迭代过程的附加阻尼比计算公式; 研究了不同阻尼指数下激励频率对附加阻尼比计算取值的影响, 并提出非共振情况下附加阻尼比的简化计算公式, 在此基础上以反应谱平均周期为地震动的激励频率, 给出了考虑激励频率且不需要计算结构动力反应的附加阻尼比简化计算方法; 通过算例和非线性时程分析结果进行对比, 验证了所提出方法的准确性。

关键词: 消能减震结构; 附加阻尼比; 非线性黏滞阻尼器; 反应谱平均周期

中图分类号: TU352.11; TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)01-0029-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.01.004

引言

黏滞阻尼器附加阻尼比的计算是减震结构设计的核心环节, 而非线性黏滞阻尼器附加阻尼比的计算由于其在地震作用下的非线性而更为复杂^[1-3]。减震结构的有效总阻尼比主要由三部分组成: 结构固有阻尼比、阻尼器附加给结构的阻尼比以及结构非线性行为下的滞回阻尼比, 其中滞回阻尼比只有在结构出现损伤时才会出现, 评估减震结构弹性行为下减震效果的关键在于阻尼器附加阻尼比的计算。相关学者对于附加阻尼比的计算方法已经做了大量研究, 2008年, Charney等^[4]运用振型应变能法、自由振动对数衰减法和复特征值特征向量法分析了单层单跨结构的附加阻尼比; 2009年 Antonio^[5]提出了一种基于动力系统状态空间方程计算模态阻尼比的方法; 2013年, 巫振弘等^[6]总结了规范方法和减震系数法两种工程中用于减震结构附加阻尼比计算的方法, 并提出适宜于计算机编程计算的自由振动衰减法。这些方法都需要先计算出减震结构的地震响应, 且需要多次复杂的迭代计算过程, 为了简化附加阻尼比的计算, 一些学者也提出了一些简化计算方法。2008年, LI Bo等^[7]根据改进能力谱和给定的性能准则得到结构有效总阻尼比, 进而得到阻尼器的

附加阻尼比, 该方法经一步计算就能求得结构满足性能目标所需的附加阻尼比而无需迭代, 但是该方法忽略了结构非线性行为对于黏滞阻尼器附加阻尼比的影响; 2012年, Diotallevi等^[8]为了避免复杂的迭代计算, 提出了一种基于阻尼指标直接评估减震结构附加阻尼比的方法, 该方法可以根据阻尼指标和结构固有周期直接在图谱中得到附加阻尼比, 但是该图谱仍需要迭代计算减震结构响应才能获得; 2014年, Lancli等^[9]提出一种基于常数设计加速度曲线和常数设计位移曲线直接评估减震结构附加阻尼比方法, 该方法虽然避免了计算结构响应, 但是没有考虑地震动激励频率对于结构附加阻尼比的影响。

目前计算非线性黏滞阻尼器附加阻尼比的方法通常基于能量原理^[10-11], 未考虑地震动频谱特性且需要迭代计算出响应才能进一步求得附加阻尼比, 求解过程比较复杂, 不便应用于工程实际。

1 通过计算结构响应求解非线性黏滞阻尼器的附加阻尼比

1.1 通过能量比值计算非线性黏滞阻尼器的附加阻尼比

Chopra^[11]根据滞回耗能等效原理提出了经典的

附加阻尼比计算公式

$$\zeta_{sd} = \frac{w_D}{4\pi w_{s0}} \frac{\omega}{\Omega} \quad (1)$$

式中 w_{s0} 为配置黏滞阻尼器的减震结构在预期位移下的总应变能, w_D 为黏滞阻尼器在减震结构预期层间位移下往复循环一周所消耗的能量, ω 和 Ω 分别为结构基本频率和激励频率。

黏滞阻尼器的阻尼力与速度的关系为

$$F_D = c_a \operatorname{sgn}(\dot{u}) |\dot{u}|^\alpha \quad (2)$$

式中 c_a 为对应不同阻尼指数 α 时的阻尼系数, $\operatorname{sgn}(x)$ 为一个正负符号函数。给单自由度体系一个位移控制的简谐激励 $u(t) = u_0 \sin \Omega t$, 其中, u_0 为位移峰值, 则非线性黏滞阻尼器的耗能公式为

$$w_D = \int F_D du = \int_0^{2\pi/\Omega} c_a |\dot{u}|^{1+\alpha} dt \quad (3)$$

通过积分, 式(3)变形如下

$$w_D = \lambda c_a u_0^{1+\alpha} \Omega^\alpha \quad (4)$$

式中 λ 为与 α 有关的常数。

当 $\alpha=1$ 时, $\lambda = \pi$

$$w_D = \pi c_1 u_0^2 \Omega \quad (5)$$

令线性阻尼器和非线性阻尼器耗能相等, 即式(4)与式(5)相等得到线性阻尼系数 c_1 的表达式如下式所示

$$c_1 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{c_a}{(\Omega u_0)^{1-\alpha}} \quad (6)$$

然后两边同时除以 $2m\omega$ 得到非线性黏滞阻尼器附加阻尼比的计算公式^[9]

$$\zeta_{sd} = \frac{\lambda}{\pi} \frac{c_a}{2m\omega} \frac{1}{(\Omega u_0)^{1-\alpha}} \quad (7)$$

式中 m 为结构质量。

这一经典方法概念清晰、易于理解, 但必须要通过数值迭代计算出与附加阻尼比匹配的结构响应, 进而才能得到附加阻尼比, 计算过程较为复杂, 不便应用于工程实际。

1.2 采用阻尼指标计算非线性黏滞阻尼器的附加阻尼比

针对能量比法的不足之处, Diotallevi 等提出了一种基于阻尼指标直接评估附加阻尼比的方法^[8]。对于一个简谐激励下的单自由度体系, 阻尼指标 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{\lambda}{\pi} \frac{c_a}{2m} \frac{\omega^{1-2\alpha}}{\Omega^{1-\alpha}} a_0^{\alpha-1} \quad (8)$$

式中 a_0 为简谐激励的峰值加速度。

对于一个地震激励下的单自由度体系, 令激励频率 Ω 与结构基本频率 ω 相等, 则式(7)可以表达成

$$\zeta_{sd} = \frac{\lambda}{\pi} \frac{c_a}{2m\omega^{2-\alpha}} \frac{1}{u_0^{1-\alpha}} \quad (9)$$

阻尼指标 ϵ 为

$$\epsilon = \frac{\lambda}{\pi} \frac{c_a}{2m} \frac{1}{\omega^\alpha} \ddot{u}_{g0}^{\alpha-1} \quad (10)$$

式中 \ddot{u}_{g0} 为地震激励的峰值加速度。

通过动力放大系数 R_d 和阻尼指标 ϵ 的关系, 求得附加阻尼比 ζ_{sd}

$$\zeta_{sd} = \epsilon R_d^{\alpha-1} \quad (11)$$

通过数值迭代计算出结构响应进而得到动力放大系数 R_d , 然后根据结构和输入特性求出阻尼指标 ϵ , 再根据式(11)计算出附加阻尼比 ζ_{sd} 。图1给出了在简谐激励下, 阻尼指数 $\alpha=0.50$, 不同阻尼指标 ϵ 下附加阻尼比的变化曲线; 图2给出了 El-Centro 地震波激励下, 阻尼指数 $\alpha=0.50$, 不同阻尼指标 ϵ 下附加阻尼比的变化曲线。显然, 根据阻尼指标 ϵ 和频率比 (Ω/ω) 或者结构固有周期 T , 可以直接在图1或图2中确定附加阻尼比 ζ_{sd} , 从而避免了结构响应的计算, 有一定的简便性, 但是图1和2依然是通过数值迭代计算非线性响应而得到的。

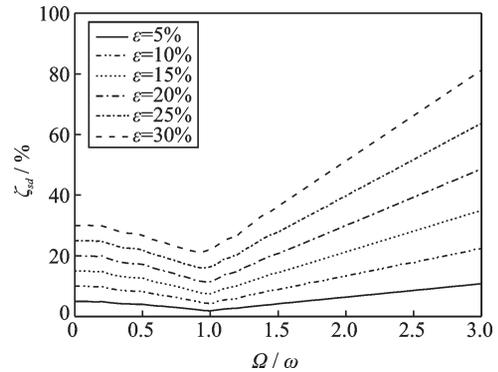


图1 简谐激励下, 阻尼指数 $\alpha=0.50$, 不同阻尼指标 ϵ (%), 附加阻尼比的变化曲线

Fig. 1 Spectra of the supplemental damping ratio for different damper indexes ϵ (expressed in percentage) and $\alpha = 0.50$ for the harmonic excitation

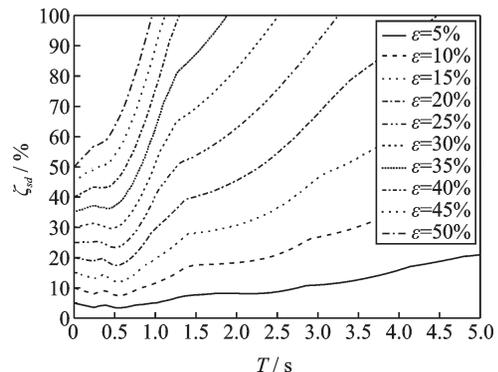


图2 El-Centro地震波激励下, 阻尼指数 $\alpha=0.50$, 不同阻尼指标 ϵ (%), 附加阻尼比的变化曲线

Fig. 2 Spectra of the supplemental damping ratio for different values of ϵ (expressed in percentage) and $\alpha = 0.50$ for the El-Centro ground motion

2 考虑地震动频谱特性且无需计算结构响应的附加阻尼比计算

2.1 简谐激励下减震体系的附加阻尼比计算

配置线性阻尼器的单自由度体系在简谐激励下的运动方程为

$$m\ddot{u} + c_1\dot{u} + ku = a_0 m \sin \Omega t \quad (12)$$

式(12)的完整解^[11]为

$$u(t) = \underbrace{e^{-\zeta_1 \omega t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t)}_{\text{瞬态}} + \underbrace{C \sin \Omega t + D \cos \Omega t}_{\text{稳态}} \quad (13)$$

式中 ω_D 为结构阻尼频率, $\omega_D = \omega \sqrt{1 - \zeta_1^2}$, ω 为结构固有频率, ζ_1 为线性黏滞阻尼器的阻尼比。

考虑初始条件: $u(0) = 0, \dot{u}(0) = 0$, 得到

$$\begin{cases} C(\zeta_1, \frac{\Omega}{\omega}) = \frac{a_0}{\omega^2} \frac{1 - (\Omega/\omega)^2}{[1 - (\Omega/\omega)^2]^2 + [2\zeta_1(\Omega/\omega)]^2} \\ D(\zeta_1, \frac{\Omega}{\omega}) = \frac{a_0}{\omega^2} \frac{-2\zeta_1(\Omega/\omega)}{[1 - (\Omega/\omega)^2]^2 + [2\zeta_1(\Omega/\omega)]^2} \end{cases} \quad (14)$$

式(13)中的稳态响应

$$u_s = u_{s0} \sin(\Omega t + \varphi) \quad (15)$$

其中, $u_{s0} = \sqrt{C^2 + D^2}$, $\varphi = D/C$ 。

取线性阻尼器运动方程完整解中的稳态响应 u_s 作为结构的近似响应, 故有

$$u_0 = u_{s0} \quad (16)$$

令线性阻尼器与非线性阻尼器的耗能相等, 输入同一个地震波, 对于同一个结构而言, 线性阻尼器运动方程的响应峰值与非线性阻尼器运动方程的响应峰值相等, 进而二者结构应变能也相等, 即有

$$\zeta_1 = \zeta_{sd} \quad (17)$$

将式(16)代入式(7), 又因式(17), 可得到附加阻尼比的计算公式

$$\zeta_{sd} = \frac{\lambda}{\pi} \frac{c_a}{2m\omega} \frac{1}{(\Omega \sqrt{C^2 + D^2})^{1-\alpha}} \quad (18)$$

利用公式(18)无需计算响应便可得到非线性黏滞阻尼器的附加阻尼比。图 3-4 对比了公式(18)与能量比法的计算结果, 可以发现, 当 $\frac{\Omega}{\omega} \leq 1$ 时, 公式(18)的计算结果与能量比法的计算结果吻合较好; 当 $\frac{\Omega}{\omega} > 1$ 时, 由于瞬态解对于结构响应的影响, 公式(18)的计算结果相对于能量比法的计算结果偏大。

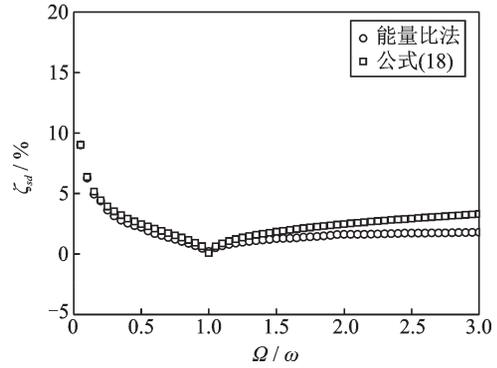


图 3 阻尼指数 $\alpha=0.50$, 自变量为频率比 Ω/ω , 两种计算附加阻尼比方法的结果对比

Fig. 3 The comparison of the results of the two methods to calculate the additional damping ratio for $\alpha=0.50$ and independent variable is frequency ratio Ω/ω

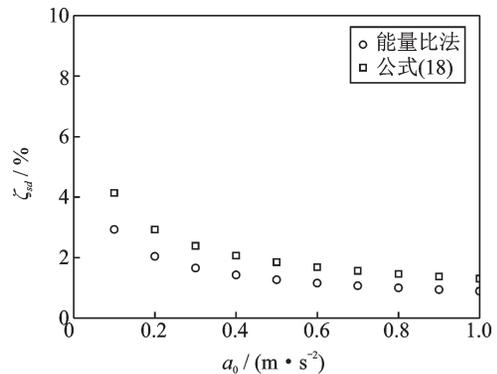


图 4 频率比 $\Omega/\omega=1.50$, 自变量为激励加速度峰值 a_0 , 两种计算附加阻尼比方法的结果对比

Fig. 4 The comparison of the results of the two methods to calculate the additional damping ratio for $\Omega/\omega=1.50$ and independent variable is peak acceleration a_0

公式(18)虽然避免了计算结构的响应, 但是仍需要迭代计算。为进一步简化, 考虑到结构在共振时对于阻尼最敏感^[11]且附加阻尼比取值保守, 取 $\Omega = \omega$ 。

当 $\Omega = \omega$ 时, 由式(15)得到

$$u_{s0} = \frac{a_0}{2\omega^2 \zeta_1} \quad (19)$$

将式(19)代入式(6), 又因 $\zeta_1 = \frac{c_1}{2\omega m}$, 得到

$$c_1 = \left[\frac{\lambda}{\pi} \left(\frac{1}{a_0 m} \right)^{1-\alpha} c_a \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (20)$$

将式(20)两边同时除以 $2m\omega$ 得到

$$\zeta_{sd, res} = \frac{1}{2m\omega} \left[\frac{\lambda}{\pi} \left(\frac{1}{a_0 m} \right)^{1-\alpha} c_a \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (21)$$

利用公式(21), 在已知结构特性、简谐激励峰值 a_0 、阻尼指数 α 和阻尼系数 c_a 后, 可以计算出附加阻尼比。图 5-10 给出了不同 α 和 c_a 下, $\zeta_{sd, res}$ 与 a_0 的关系

曲线,从图中可以发现,能量比法的计算结果和公式(21)的计算结果吻合较好;阻尼指数越大,能量比法的计算结果和公式(21)的计算结果吻合越高;阻尼系数越大,附加阻尼比越大。

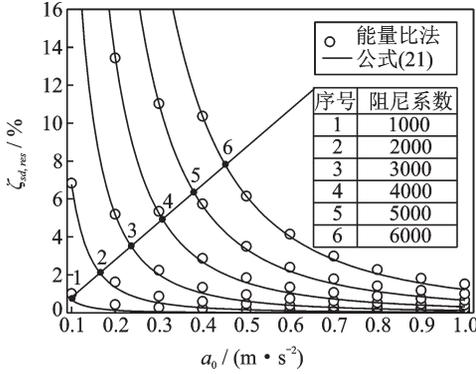


图5 阻尼指数 $\alpha=0.30$,不同阻尼系数 c_d (kN·s/m),两种方法计算附加阻尼比结果对比

Fig. 5 The comparison of the results of the two methods to calculate the additional damping ratio for $\alpha=0.30$ and different damping coefficients c_d (kN·s/m)

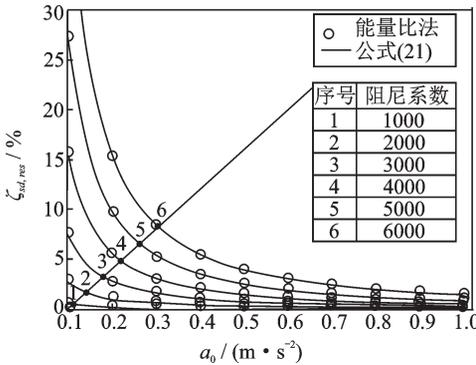


图6 阻尼指数 $\alpha=0.40$,不同阻尼系数 c_d (kN·s/m),两种方法计算附加阻尼比结果对比

Fig. 6 The comparison of the results of the two methods to calculate the additional damping ratio for $\alpha=0.40$ and different damping coefficients c_d (kN·s/m)

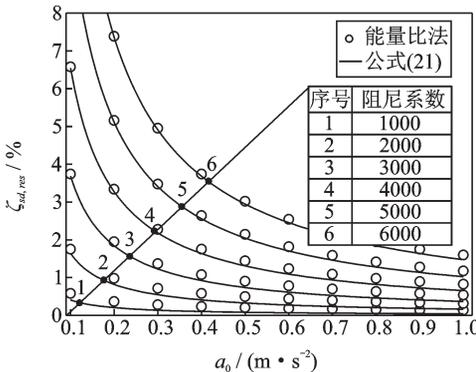


图7 阻尼指数 $\alpha=0.50$,不同阻尼系数 c_d (kN·s/m),两种方法计算附加阻尼比结果对比

Fig. 7 The comparison of the results of the two methods to calculate the additional damping ratio for $\alpha=0.50$ and different damping coefficients c_d (kN·s/m)

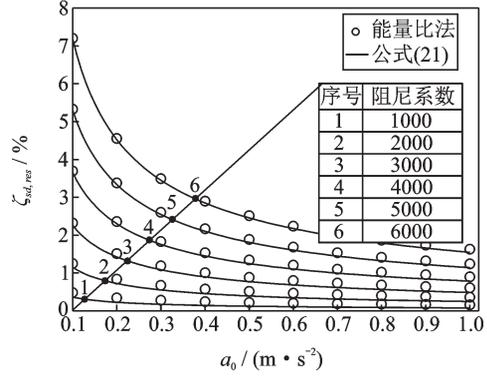


图8 阻尼指数 $\alpha=0.60$,不同阻尼系数 c_d (kN·s/m),两种方法计算附加阻尼比结果对比

Fig. 8 The comparison of the results of the two methods to calculate the additional damping ratio for $\alpha=0.60$ and different damping coefficients c_d (kN·s/m)

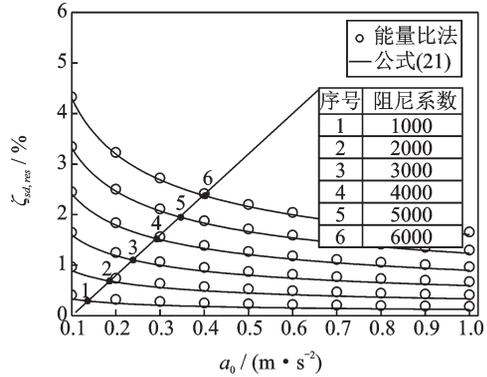


图9 阻尼指数 $\alpha=0.70$,不同阻尼系数 c_d (kN·s/m),两种方法计算附加阻尼比结果对比

Fig. 9 The comparison of the results of the two methods to calculate the additional damping ratio for $\alpha=0.70$ and different damping coefficients c_d (kN·s/m)

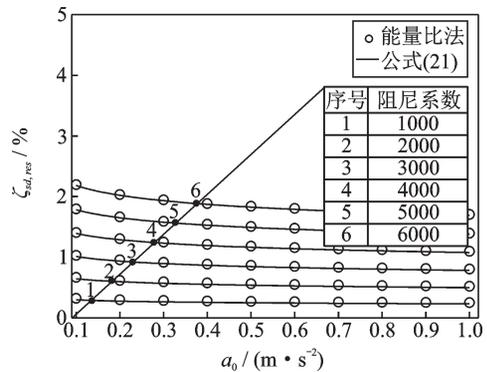


图10 阻尼指数 $\alpha=0.90$,不同阻尼系数 c_d (kN·s/m),两种方法计算附加阻尼比结果对比

Fig. 10 The comparison of the results of the two methods to calculate the additional damping ratio for $\alpha=0.90$ and different damping coefficients c_d (kN·s/m)

2.2 考虑激励频谱特性的附加阻尼比简化计算

上述方法基于激励频率 Ω 等于结构基本频率 ω ,但一般情况下二者是不相等的,针对这种情况,需对公式(21)进行修正。图11-14给出了通过能量

比法得到的 ζ_{sd} 与 Ω/ω 关系曲线,从图中发现可以将曲线拟合成过结构共振点 $(1, \zeta_{sd, res})$ 的分段函数,当 $\Omega/\omega < 1$ 时,可拟合成抛物线;当 $\Omega/\omega > 1$ 时,可拟合成直线,得到

$$\zeta_{sd} = \begin{cases} a_1(\Omega/\omega - 1)^2 + \zeta_{sd, res} & \Omega/\omega < 1 \\ \zeta_{sd, res} & \Omega/\omega = 1 \\ a_2(\Omega/\omega - 1) + \zeta_{sd, res} & \Omega/\omega > 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中 $\zeta_{sd, res}$ 为结构共振时的附加阻尼比,可由公式(21)计算得到。

a_1 和 a_2 可以通过数值拟合得到:

$$a_1 = \beta_1 e^{\gamma_1 \alpha} \quad (23)$$

$$a_2 = \beta_2 e^{\gamma_2 \alpha} \quad (24)$$

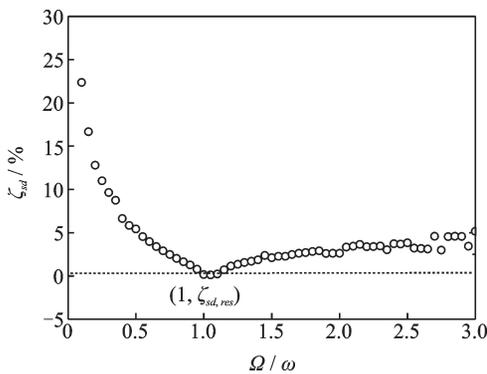


图 11 $\alpha=0.3$ 时, ζ_{sd} 与 Ω/ω 的关系曲线

Fig. 11 The relationship curve of ζ_{sd} and Ω/ω for $\alpha=0.3$

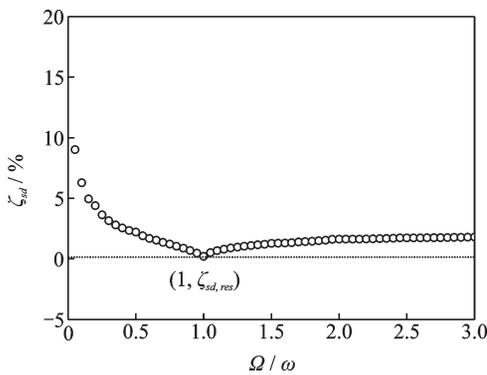


图 12 $\alpha=0.5$ 时, ζ_{sd} 与 Ω/ω 的关系曲线

Fig. 12 The relationship curve of ζ_{sd} and Ω/ω for $\alpha=0.5$

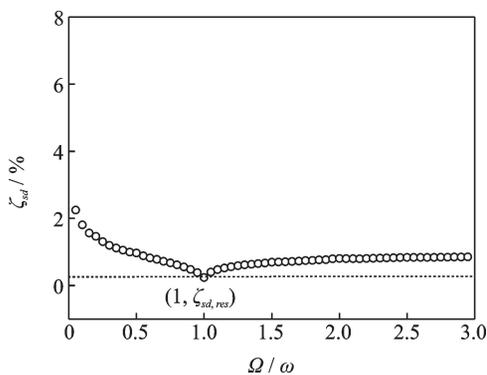


图 13 $\alpha=0.7$ 时, ζ_{sd} 与 Ω/ω 的关系曲线

Fig. 13 The relationship curve of ζ_{sd} and Ω/ω for $\alpha=0.7$

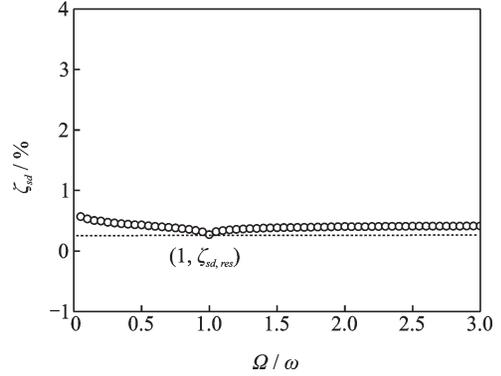


图 14 $\alpha=0.9$ 时, ζ_{sd} 与 Ω/ω 的关系曲线

Fig. 14 The relationship curve of ζ_{sd} and Ω/ω for $\alpha=0.9$

式中 $\beta_1=109.6, \gamma_1=-5.489, \beta_2=10.02, \gamma_2=-4.649$ 。

图 15-16 给出了不同阻尼指数 α 下, a_1 和 a_2 的变化曲线。

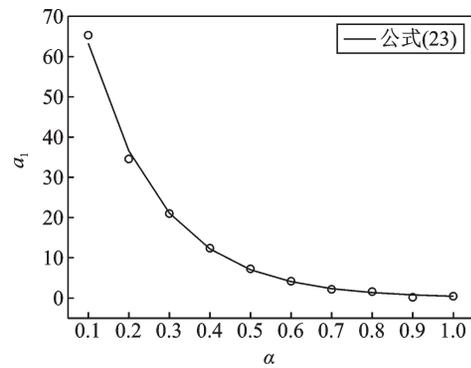


图 15 a_1 的拟合曲线

Fig. 15 The fitting curve of a_1

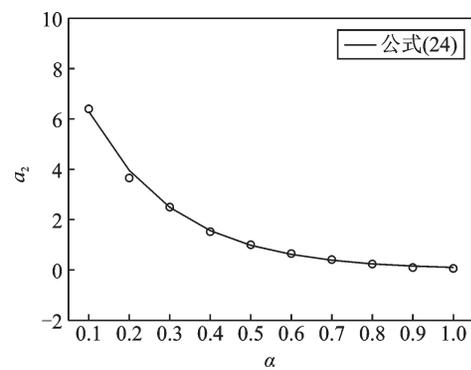


图 16 a_2 的拟合曲线

Fig. 16 The fitting curve of a_2

利用公式(22)可以无需计算结构动力响应得到考虑激励频谱特性后的附加阻尼比。图 17-20 给出了不同阻尼指数 α, ζ_{sd} 和 Ω/ω 的关系曲线,对比了能量比法、公式(18)和(22)的计算结果。从图中可以看出,公式(18)的计算结果在 $\Omega/\omega > 1$ 时偏大,但公式(22)的计算结果与能量比法的计算结果吻合较好,具有一定的工程精度。

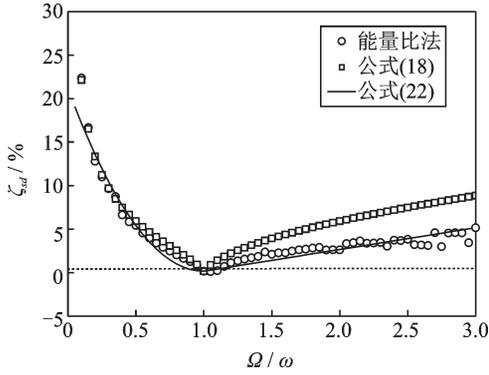


图17 阻尼指数 $\alpha=0.30$,附加阻尼比 ζ_{sd} 与频率比 Ω/ω 的变化曲线

Fig. 17 Additional damping ratio ζ_{sd} versus frequency ratio Ω/ω for $\alpha=0.30$

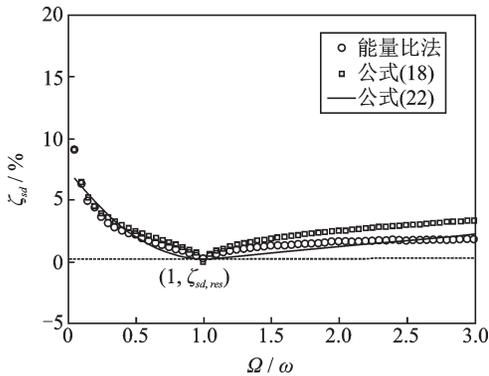


图18 阻尼指数 $\alpha=0.50$,附加阻尼比 ζ_{sd} 与频率比 Ω/ω 的变化曲线

Fig. 18 Additional damping ratio ζ_{sd} versus frequency ratio Ω/ω for $\alpha=0.50$

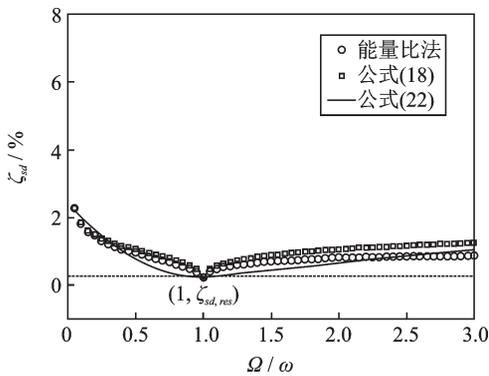


图19 阻尼指数 $\alpha=0.70$,附加阻尼比 ζ_{sd} 与频率比 Ω/ω 的变化曲线

Fig. 19 Additional damping ratio ζ_{sd} versus frequency ratio Ω/ω for $\alpha=0.70$

2.3 地震动激励下减震结构的附加阻尼比计算

由于地震动频率的复杂性,以往的研究都没有考虑地震频率对于附加阻尼比的影响,针对这种情况拟推导出无需计算结构动力响应且考虑地震动频谱特性的附加阻尼比计算公式。

简谐激励下结构共振时 u_0 近似等于 $\frac{a_0}{2\omega^2\zeta_1}$,而地

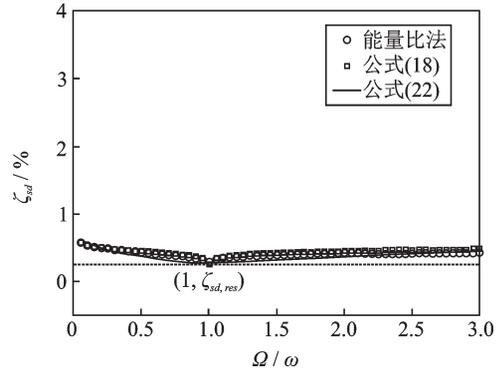


图20 阻尼指数 $\alpha=0.90$,附加阻尼比 ζ_{sd} 与频率比 Ω/ω 的变化曲线

Fig. 20 Additional damping ratio ζ_{sd} versus frequency ratio Ω/ω for $\alpha=0.90$

震激励下,如果令

$$u_w = \frac{\ddot{u}_{g0}}{2\omega^2\zeta_1} \quad (25)$$

那么 u_0 与 u_w 同样存在一定的关系。记二者的比值为 $f_1=u_0/u_w$,则

$$u_0 = f_1 \frac{\ddot{u}_{g0}}{2\omega^2\zeta_1} \quad (26)$$

式中 \ddot{u}_{g0} 为地震激励峰值加速度。

将式(26)代入式(9),得到 $\Omega=\omega$ 时的结构共振附加阻尼比计算公式

$$\zeta_{sd, res} = \frac{\lambda}{\pi} \frac{c_\alpha}{2m\omega^{2-\alpha}} \frac{1}{\left(f_1 \frac{\ddot{u}_{g0}}{2\omega^2\zeta_1}\right)^{1-\alpha}} \quad (27)$$

又因公式(17),公式(27)变形为

$$\zeta_{sd, res} = \frac{\lambda}{\pi} \frac{c_\alpha}{2m\omega^{2-\alpha}} \frac{1}{\left(f_1 \frac{\ddot{u}_{g0}}{2\omega^2\zeta_{sd}}\right)^{1-\alpha}} \quad (28)$$

利用公式(22)得到 $\Omega \neq \omega$ 时地震激励下的附加阻尼比计算公式

$$\zeta_{sd} = \begin{cases} a_1(\Omega_m/\omega - 1)^2 + \zeta_{sd, res} & \Omega_m/\omega < 1 \\ \zeta_{sd, res} & \Omega_m/\omega = 1 \\ a_2(\Omega_m/\omega - 1) + \zeta_{sd, res} & \Omega_m/\omega > 1 \end{cases} \quad (29)$$

式中 Ω_m 为地震激励的平均频率。

地震波的平均周期 T_m 可通过下式计算^[12]

$$T_m = \frac{\sum_i C_i^2 (1/f_i)}{\sum_i C_i^2} \quad (30)$$

式中 C_i 为傅里叶峰值系数, f_i 为快速傅里叶变换的离散频率。

再通过下式计算地震波的平均频率 Ω_m

$$\Omega_m = \frac{2\pi}{T_m} \quad (31)$$

分别利用能量比法、公式(28)和公式(29)计算减震结构的附加阻尼比,图21-22以El-Centro地震波为例给出了阻尼指数 $\alpha=0.50$,不同阻尼系数 c_α

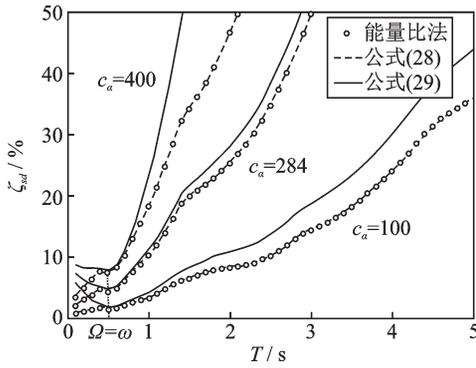


图 21 在 El-Centro 地震波激励下, 阻尼指数 $\alpha=0.50$, 不同阻尼系数 c_a (kN·s/m) 下, 附加阻尼比的变化曲线图

Fig. 21 Spectra of the supplemental damping ratio for different values of c_a (kN·s/m) and $\alpha=0.50$ for the El-Centro ground motion

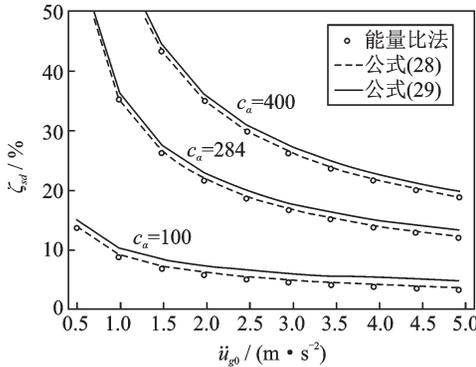


图 22 在 El-Centro 地震波激励下, 阻尼指数 $\alpha=0.50$, 频率比 $\Omega_m/\omega=2$, 不同阻尼系数 c_a (kN·s/m) 下, 附加阻尼比的变化曲线图

Fig. 22 Spectra of the supplemental damping ratio for different values of c_a (kN·s/m) and $\alpha=0.50$, $\Omega_m/\omega=2$ for the El-Centro ground motion

(kN·s/m) 下, 附加阻尼比 ζ_{sd} 与结构自振周期 T 或地震激励峰值 \ddot{u}_{g0} 的变化曲线。

从图中可以看出, 当 $\Omega=\omega$ 时公式(28)与能量比法的计算结果比较吻合, 而 $\Omega\neq\omega$ 时公式(29)的计算结果相比能量比法的计算结果增大。公式(29)因考虑了地震动频率的影响而计算结果更加准确, 且共振点前后规律与简谐激励下一致。

3 算例分析

1997年, Takewaki^[13]对6层平面剪切框架进行减震优化设计, 框架各层质量相同, $m_1=m_2=\dots=m_6=0.80\times 10^5$ kg, 各层刚度均匀分布, $k_1=k_2=\dots=k_6=4.00\times 10^7$ N/m, 每一个黏滞阻尼器的阻尼系数 $c_1=1.50\times 10^6$ (N·s/m), 令结构初始阻尼比 $\zeta_0=0.05$ 。根据上述已知条件, 求得质量矩阵 M 、刚度矩阵 K 、阻尼矩阵 C , 结构的第一振型: $\phi^T=[0.2411, 0.4681, 0.6680, 0.8290, 0.9419, 1.0000]$, 第一振型

周期 $T=1.1656$ s, 等效单自由度的方法^[14]

$$\begin{cases} M^r = \phi^T M \phi \frac{\phi^T M 1}{\phi^T M \phi} \\ C^r = \phi^T C \phi \frac{\phi^T M 1}{\phi^T M \phi} \\ K^r = \phi^T K \phi \frac{\phi^T M 1}{\phi^T M \phi} \end{cases} \quad (32)$$

式中 M^r 为等效质量, K^r 为等效刚度, C^r 为等效阻尼, ϕ 为结构第一振型。

通过公式(32)得到等效质量 $M^r=3.32\times 10^5$ kg, 等效刚度 $K^r=9.64\times 10^6$ N/m, 等效阻尼 $C^r=6.08\times 10^5$ N·s/m。根据等效质量和等效刚度得到结构的基本周期 $T=1.1656$ s, 与原框架的一致。

表1给出了从太平洋工程地震中心选取的10条地震波以及地震波对应的平均频率 Ω_m 和频率比 Ω_m/ω 。

当 $\alpha=1$ 时, 通过公式(29)得到黏滞阻尼器附加阻尼比 $\zeta_1=16.99\%$, 将表1中每条波的峰值加速度调整为500 gal进行时程分析, 时程分析的计算结果如表1所示, 发现时程分析与公式(29)计算结果比较吻合。

当 $\alpha\neq 1$ 时, 令 $\Omega=\omega$, 则公式(6)变形为

$$c_1 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{c_a}{(\omega u_0)^{1-\alpha}} \quad (33)$$

取 $\alpha=0.50$, $u_0=0.05$ m, 通过式(33)得到等效阻尼 $C_a^r=2.84\times 10^5$ N·s/m, 其他参数与原结构相同。

以 El-Centro 地震波为例, 通过式(30)-(31)求得平均周期 T_m 为 0.56 s, $\Omega_m=11.22$ rad/s。公式(28)中的 $f_1(\zeta_{sd, res})$ 为

$$f_1(\zeta_{sd, res}) = b_1 \zeta_{sd, res}^3 + b_2 \zeta_{sd, res}^2 + b_3 \zeta_{sd, res} + b_4 \quad (34)$$

式中 $b_1=0.40, b_2=-0.89, b_3=0.84, b_4=0.04$ 。

由公式(28)可以得到 El-Centro 地震波激励下结构共振时附加阻尼比 $\zeta_{sd, res}=12.92\%$, 将该值代入到公式(29)得到考虑 El-Centro 地震波频谱特性后的附加阻尼比为 13.97%, 也可以根据阻尼系数 c_a , 结构自振周期 T 或 El-Centro 地震波的峰值加速度 \ddot{u}_{g0} , 在图20-21中得到非线性黏滞阻尼器的附加阻尼比。

采用表1中10条地震波作为输入激励, 运用能量比法式(9)、阻尼指标法式(11)、本文方法式(28)和非线性时程分析法(NMA和“抗规”法)分别计算减震结构共振时的附加阻尼比, 将式(28)得到的附加阻尼比代入到公式(29)得到考虑地震动频谱特性后的附加阻尼比。

表2对比了这6种方法计算得到的附加阻尼比, 发现结构共振时的5种方法计算结果较为接近, 其中, 因为10条地震波的峰值加速度调整为同一个值, 所以阻尼指标 ϵ 是常数值, 进而由阻尼指标法求得的附加阻尼比为一个定值。

表1 本文选用的地震记录
Tab.1 List of the considered earthquake records

Location	Year	M_s	Station	Name	PGA/g	$\Omega_m/(rad \cdot s^{-1})$	$\zeta_1(\alpha=1)$
Kern	1952	7.4	Athenaeum	KEAT	0.048	6.81	14.06
Northridge	1966	6.7	Saticoy	SATI	0.124	7.97	14.15
Kern	1952	7.4	Hollywood	KEHO	0.059	8.34	15.52
Northridge	1994	6.4	Newhall	NEWH	0.59	9.00	15.93
Imperial Valley	1968	7	El-Centro	ELCE	0.348	11.22	16.97
Kern County	1952	7.4	Taft	TAFT	0.141	11.20	18.26
Tabas	1978	6.4	Tabas	TABA	0.836	12.16	17.95
Irpinia	1980	6.9	Arienzo	IRAR	0.024	12.99	18.08
Irpinia	1980	6.9	Auletta	IRAU	0.051	14.79	19.01
Mammoth	1980	5.7	Convict	MACO	0.178	14.90	18.98

表2 不同方法计算结构的附加阻尼比
Tab.2 Different methods for calculating the additional damping ratio of the structure

地震波	附加阻尼比/%					
	$\Omega_m = \omega$			非线性时程分析法		$\Omega_m \neq \omega$ 公式(29)
	能量比法	阻尼指标法 ^{*1}	公式(28)	NMA ^{*2}	抗规法 ^[10]	
KEAT	12.19	12.78	12.23	16.61	13.92	13.43
SATI	8.00	12.78	8.13	9.57	8.05	8.79
KEHO	12.27	12.78	12.92	15.59	14.16	13.97
NEWH	9.32	12.78	9.78	13.52	11.59	10.32
ELCE	9.68	12.78	9.74	13.53	12.59	10.00
TAFT	10.39	12.78	10.68	15.25	13.77	11.74
TABA	9.66	12.78	10.05	13.95	12.30	10.52
IRAR	11.13	12.78	11.16	13.92	11.82	12.44
IRAU	13.68	12.78	13.74	18.98	15.35	15.45
MACO	13.64	12.78	14.07	16.95	14.76	15.80

注：*1 阻尼指标法^[9]；见公式(11)；*2 NMA^[15]；附加阻尼比=(阻尼器耗能/结构的模态阻尼耗能)×结构固有阻尼比

考虑地震激励频谱特性后，因10条地震波对应的 Ω_m/ω 均大于1，所以公式(29)大于公式(28)的计算结果，与简谐激励频率比大于1时附加阻尼比变化规律一致，如图23所示。由于地震激励的频谱特性对于计算结构附加阻尼比有着不可忽略的影响，所以公式(29)的计算结果理论上更为准确。

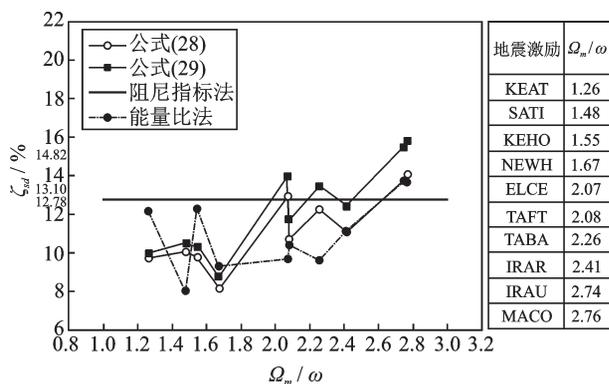


图23 公式(28)、公式(29)和阻尼指标法的计算结果对比
Fig.23 Comparison of calculation results between equation (28), equation (29) and damping index method

4 结论

(1) 推导出了在共振情况下减震结构不需要计算动力反应的附加阻尼比求解公式，然后分析了不同阻尼指数的阻尼器在考虑激励频率影响下，附加阻尼比随频率比的变化规律，进而提出了考虑激励频率影响的附加阻尼比简化计算公式。

(2) 在共振情况下阻尼器为结构提供的附加阻尼比最小；当激励频率小于结构频率时，随着激励频率减小，阻尼器为结构提供的附加阻尼比以平方关系增加；当激励频率大于结构频率时，随着激励频率增加，阻尼器为结构提供的附加阻尼比以线性关系增加。

(3) 以6层剪切型结构为例，将本文方法计算的结果与文献[13]进行了对比，并与能量比法、阻尼指标法、非线性时程分析的计算结果进行了对比，验证了本文方法的可行性和准确性。

在已知地震动特性、结构特性和阻尼器参数的情况下，采用本文的方法可以方便地计算减震结构

的附加阻尼比,但地震动的频率采用反应谱平均周期进行计算的方法有待完善。

参考文献:

- [1] Lin Y Y, Chang K C, Chen C Y. Direct displacement-based design for seismic retrofit of existing buildings using nonlinear viscous dampers [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, (6): 535-552.
- [2] Enrico T, Laura R, Andrea D A. Probabilistic seismic response assessment of linear systems equipped with nonlinear viscous dampers [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(1): 101-120.
- [3] Patel C C. Dynamic response of adjacent structures coupled by nonlinear viscous damper [J]. Advances in Structural Engineering, 2015; 1091-1102.
- [4] Charney Finley A, McNamara Robert J. Comparison of methods for computing equivalent viscous damping ratios of structures with added viscous damping [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2008, 134(1): 32-44.
- [5] Antonio Occhiuzzi. Additional viscous dampers for civil structures: Analysis of design methods based on effective evaluation of modal damping ratios [J]. Engineering Structures, 2009, 31(5): 1093-1101.
- [6] 巫振弘,薛彦涛,王翠坤,等.多遇地震作用下消能减震结构附加阻尼比计算方法[J].建筑结构学报,2013,34(12): 19-25.
WU Zhenhong, XUE Yantao, WANG Cuikun, et al. Calculation method of additional damping ratio of energy dissipation structure under multiple earthquakes [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(12): 19-25.
- [7] LI Bo, LIANG Xingwen. Seismic design of structure with supplemental viscous dampers based on improved capacity spectrum method [C]. Proceeding of the Tenth International Symposium on Structural Engineering for Yong Expert, 2008; 1230-1236.
- [8] Diotallevi P P, Landi L, Dellavalle A. A methodology for the direct assessment of the damping ratio of structures equipped with nonlinear viscous dampers [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2012, 16(3): 350-373.
- [9] Landi L, Lucchi S, Diotallevi P P. A procedure for the direct determination of the required supplemental damping for the seismic retrofit with viscous dampers [J]. Engineering Structures, 2014, 71: 137-149.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50011-2010,建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [11] Chopra A K. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering [M]. 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2001.
- [12] Rathje E M, Faraj F, Russel S, et al. Empirical relationships for frequency content parameters of earthquake ground motions [J]. Journal of Earthquake Spectra, 2004, 20: 119-144.
- [13] Takewaki I. Optimal damper placement for minimum transfer functions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1997, 26 (11): 1113-1124.
- [14] 魏巍,冯启民.几种 push-over 分析方法对比研究 [J].地震工程与工程振动,2002,22(4): 66-73.
WEI Wei, FENG Qimin. Comparative study on several push-over analysis methods [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4): 66-73.
- [15] 丁永君,刘胜林,李进军.黏滞阻尼结构小震附加阻尼比计算方法的对比分析 [J].工程抗震与加固改造,2017,39(1):78-83.
DING Yongjun, LIU Shenglin, LI Jinjun. Comparative analysis of calculation methods for additional damping ratio of small earthquakes with viscous damping structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(1): 78-83.

Simplified calculation of supplemental damping ratio of viscous damper considering excitation frequency

DU Dong-sheng¹, LIU Yan-jie¹, XU Qing-yang²

(1.College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China; 2.College of Information Engineering, Nanjing Audit University, Nanjing 211815, China)

Abstract: At present, it is necessary for the calculation of the supplemental damping ratio of the aseismic structure to calculate the dynamic response of the structure and perform the iterative process. In addition, generally only the case where the excitation frequency is equal to the fundamental frequency of the structure is considered. Based on the nonlinear viscous damper, a calculation method that without calculating the structural dynamic response directly obtains the structural supplemental damping ratio based on structural characteristics, excitation frequency and damper parameters is proposed. Firstly, several frequently used methods of calculating supplemental damping ratio are analyzed. Then, the calculation formula of the supplemental damping ratio for the excitation frequency equals to the fundamental frequency of the structure, and without calculating the structural dynamic response and the iterative process is deduced. By studying on the influence of the excitation frequency on the calculation of the supplemental damping ratio for different damping indexes, a simplified calculation formula for supplemental damping ratio in the case of non-resonance is proposed. On this basis, taking response spectrum average period as the excitation frequency of the ground motion, a simplified calculation method of the supplemental damping ratio considering the excitation frequency and no need to calculate the structural dynamic response is given. Finally, the accuracy of the proposed method is verified by comparing the results of the example with the results of nonlinear time history analyses.

Key words: energy dissipation structure; additional damping ratio; nonlinear viscous damper; response spectrum average period

作者简介:杜东升(1977-),男,博士,副教授。电话:13915955604; E-mail: ddshy@163.com