

混合基础隔震体系优化设计及性能

李春祥, 龙秋雨, 曹黎媛

(上海大学力学与工程科学学院土木工程系, 上海 200444)

摘要: 为解决基础隔震结构中隔震层位移需求过大的问题, 提出了一种基础隔震结构 (Base Isolated Structure, BIS) + 串并联调谐质量阻尼器惯容器 (Tuned Tandem Mass Damper-Inerter, TTMDI) 的混合隔震体系。采用 Bouc-Wen 滞回模型模拟隔震层的非线性力-变形行为, 基于随机等效线性化和模式搜索优化算法并考虑地震动模型, 在频域内建立了 BIS+TTMDI 体系的优化设计框架。分别从鲁棒性、有效性、刚度和阻尼系数、冲程及对地震频率敏感性方面对 BIS+TTMDI 体系的性能进行评估, 并与 BIS+调谐质量阻尼器 (Tuned Mass Damper, TMD)、串并联调谐质量阻尼器 (Tuned Tandem Mass Damper, TTMD) 和调谐质量阻尼器惯容器 (Tuned Mass Damper-Inerter, TMDI) 进行比较。通过对近场地震动下某七层混合基础隔震结构 (包括 BIS+TTMDI 和 BIS+TMDI 体系) 的动力弹塑性分析, 评价了其减/隔震性能。结果表明: BIS+TTMDI 体系具有最好的减/隔震性能和强鲁棒性; 而且在 BIS+TTMDI 体系中 TTMDI 的总阻尼需求不到 BIS+TMDI 体系中 TMDI 的一半, 因而更为经济实用。

关键词: 混合基础隔震; 结构振动控制; 优化设计; 等效线性化; 动力弹塑性分析

中图分类号: TU352.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)01-0137-11

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.01.014

引言

高效提升重要社会功能建筑 (例如政府和医院建筑、通讯大楼等) 的抗震性能, 实现其震后功能可恢复, 对城市或地区运营至关重要。传统抗震设计难以实现高烈度区建筑的可恢复抗震; 而基础隔震体系 (Base Isolated System, BIS) 是实现建筑震后功能恢复的一种可行策略。近年的强震表明, 设计合理的基础隔震建筑在震后可立即使用。BIS 的基本原理为: 通过在上部结构和基础之间插入侧向柔性隔震层, 延长结构基本周期, 从而降低上部结构受到地震的影响。而对近场地震动, 在发震的很短时间内, 大部分能量到达结构, 迫使结构在很少几个位移循环内消耗该能量, 即使是基础隔震建筑也可能遭受严重破坏; 其主要原因为: 近场地震动具有早期到达的高能、丰富而强烈的长周期速度脉冲分量, 当与 BIS 等效自振周期相近时, 发生类共振而进一步放大隔震层位移。因此, 近场地震动下隔震层的位移需求过大是 BIS 的关键共性问题。

增大 BIS 附加阻尼或在隔震层增设黏滞阻尼器 (Viscous Damper, VD) 是解决此关键共性问题的直接策略^[1]。陈瑞生等^[2]提出了采用非支配排序遗

传算法-II (NSGA-II) 对黏滞阻尼器的参数进行多目标优化, 其数值分析表明: 黏滞阻尼器减震效果与隔震层附加阻尼有关, 提供过大的附加阻尼会增大上部结构的加速度, 而增大的加速度会对振动的敏感高科技设备和设施产生威胁。另外, 最常见的策略是将 BIS 与调谐质量阻尼器 (Tuned Mass Damper, TMD) 进行集成^[3-5]; 尽管 TMD 可以有效减少隔震层位移, 但其大冲程和大质量需求极大地限制了其工程应用。近年发展的 TMD-惯容器 (Tuned Mass Damper-Inerter, TMDI) 推动了该问题的解决, 一些学者系统地研究了 BIS+TMDI 体系的减/隔震性能^[6-10]。惯容器的质量放大功能使物理质量很小的 TMDI 具备高有效性, 因而 BIS+TMDI 有工程可实现性。但在实际工程应用中, TMDI 仍然存在短板: 不总具有强鲁棒性。为大幅提升 BIS+TMDI 对不同地震动的鲁棒性, 突破 BIS 的关键共性问题, Cao 等^[11]提出了高性能混合被动基础隔震体系—BIS+串并联调谐质量阻尼器惯容器 (Tuned Tandem Mass Dampers-Inerters, TTMDI) 体系, 即 BIS+TTMDI 体系。

现有研究表明, 隔震装置的非线性恢复力可简化为由线性刚度和线性黏性阻尼进行表示, 这种理想化假设在一定地震作用下对低阻尼橡胶轴

承而言是合理的,但在强地震激励下,隔震装置易于超过弹性变形阈值而表现为非线性,其恢复力不再保持线性行为。比如,铅芯橡胶隔震支座(Lead Rubber Bearing, LRB)在强震中(特别在近断层地震动作用下)总是表现出明显非线性。严格地说,在这些情况下,在BIS分析中应适当考虑其非线性滞回行为。研究表明,TMD应用于非线性结构时的性能与线性情况显著不同(更差),主要是因为非线性范围内刚度变化引起的失谐效应^[12-14]。显然,在强震作用下,假设BIS为理想线性行为,很难真实评估TMD,TMDI,TTMD和TTMDI的实际减震性能。此外,高性能TTMDI用于非线性BIS的优化设计及其减/隔震性能尚未被研究。综上所述,本文考虑隔震层非线性力-变形行为,研究BIS+TTMDI混合体系的减/隔震性能。

1 BIS+TTMDI 混合隔震体系运动方程

1.1 非线性隔震层模型

隔震层采用铅芯橡胶隔震支座(Lead Rubber Bearing, LRB),LRB的恢复力特性由Bouc-Wen滞回模型^[10]表示,其数学表达式如下:

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & K_3 \\ K_4 & K_2 \end{bmatrix}, K_1 = \begin{bmatrix} \alpha k_b + k_1 + k_{t1} + k_{t2} & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ & & -k_n & k_n \end{bmatrix}, K_2 = \begin{bmatrix} k_{t1} & 0 \\ 0 & k_{t2} \end{bmatrix}, K_4 = K_3^T = \begin{bmatrix} -k_{t1} & 0 & \cdots & 0 \\ -k_{t2} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{2 \times (n+1)}$$

$$; C = \begin{bmatrix} C_1 & C_3 \\ C_4 & C_2 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} c_{t1} + c_T & -c_T \\ -c_T & c_{t2} + c_T \end{bmatrix}, C_4 = C_3^T = \begin{bmatrix} -c_{t1} & 0 & \cdots & 0 \\ -c_{t2} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{2 \times (n+1)}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} c_b + c_1 + c_{t1} + c_{t2} & -c_1 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ & & -c_n & c_n \end{bmatrix};$$

$$H = [(1-\alpha)F_y \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]^T; \mathbf{I} = [m_b \quad m_1 \quad \cdots \quad m_n \quad m_{t1} \quad m_{t2}]^T。$$

其中: $\mathbf{x} = [x_b \quad x_1 \quad \cdots \quad x_n \quad x_{t1} \quad x_{t2}]^T$, $x_b, x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 和 x_{t1}, x_{t2} 分别为隔震层、上部结构第 i 层和 TMD1, TMD2 质量块相对于地面的位移; 上标“·”表示对时间 t 的一阶导数, “··”表示对时间 t 的二阶导数; $m_b, m_i (i=1, 2, \dots, n)$ 和 m_{t1}, m_{t2} 分别为隔震层、上部结构第 i 层和 TMD1, TMD2 质量块的质量; $k_i (i=1, 2, \dots, n)$, k_{t1} 和 k_{t2} 分别为上部结构第 i 层、TMD1 和 TMD2 的刚度; $c_i (i=1, 2, \dots, n)$, c_{t1}, c_{t2}

$$F_b = \alpha k_b x_b + (1-\alpha) F_y Z \quad (1)$$

$$q\dot{Z} = A\dot{x}_b - \gamma |\dot{x}_b| |Z| |\dot{Z}|^{\eta-1} - \beta \dot{x}_b |Z|^\eta \quad (2)$$

式中 F_b 为 LRB 的恢复力; k_b 为 LRB 的初始刚度; α 为 LRB 屈服后与屈服前刚度的比值; F_y 为 LRB 的屈服强度; Z 为满足式(2)的无量纲滞回量; q 为隔震层的屈服位移; 参数 A, γ, β 和 η 为控制滞回曲线形状的无量纲参数。

1.2 BIS+TTMDI 混合隔震体系运动方程

图1给出了地震地面运动加速度作用下结构-BIS+TTMDI体系的力学模型。将TTMD装置安装在隔震层,通过惯容器将质量块TMD1和TMD2与地面相连,在地震地面运动加速度作用下BIS+TTMDI体系的运动方程的矩阵形式为:

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} + HZ = -I\ddot{x}_g \quad (3)$$

式中 \ddot{x}_g 表示地震地面加速度; M, C 和 K 分别表示 BIS+TTMDI 的质量、阻尼和刚度矩阵, 表示为:

$$M = \begin{bmatrix} M_1 & M_3 \\ M_4 & M_2 \end{bmatrix}, M_1 = \begin{bmatrix} m_b & & & & 0 \\ & m_1 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & m_{n-1} & \\ 0 & & & & m_n \end{bmatrix},$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} m_{t1} + b_1 & 0 \\ 0 & m_{t2} + b_2 \end{bmatrix}, M_3 = M_4^T = \mathbf{0}_{(n+1) \times 2};$$

和 c_T 分别为上部结构第 i 层阻尼、TMD1 阻尼、TMD2 阻尼和 TMD1 与 TMD2 间的连接阻尼; \ddot{x}_g 代表地震地面运动加速度; b_1 和 b_2 分别表示惯容器 1 和惯容器 2 的惯容系数; \ddot{u}_1 和 \ddot{u}_2 分别表示惯容器两个端点的加速度; F_1 代表惯容器的惯性力。

隔震层屈重比 F_0 表示为:

$$F_0 = \frac{F_y}{Mg} \quad (4)$$

$$C_g = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{(n+3) \times 1} & \mathbf{0}_{(n+3) \times 1} \\ \mathbf{M}_{(n+3) \times (n+3)}^{-1} \mathbf{I}_{(n+3) \times 1} \omega_f^2 & \mathbf{M}_{(n+3) \times (n+3)}^{-1} \mathbf{I}_{(n+3) \times 1} (2\xi_f \omega_f) \\ 0 & 0 \\ \mathbf{0}_{(n+3) \times 1} & \mathbf{0}_{(n+3) \times 1} \\ -\mathbf{M}_{(n+3) \times (n+3)}^{-1} \mathbf{I}_{(n+3) \times 1} \omega_g^2 & -\mathbf{M}_{(n+3) \times (n+3)}^{-1} \mathbf{I}_{(n+3) \times 1} (2\xi_g \omega_g) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_g = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\omega_f^2 & -2\xi_f \omega_f & \omega_g^2 & 2\xi_g \omega_g \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\omega_g^2 & -2\xi_g \omega_g \end{bmatrix}$$

系统响应协方差矩阵 Γ 可表示为:

$$\dot{\Gamma} = B\Gamma + \Gamma B^T + D \quad (12)$$

式中 D 表示基岩层激励的输入矩阵,除了对角线上最后一项为 $2\pi S_0$ 之外,其他所有项都为零。响应协方差矩阵 Γ 的元素可表示为:

$$\Gamma_{ij} = E(V_i V_j)$$

在平稳随机激励下,系统响应协方差矩阵与时间无关,因此协方差矩阵可简化为:

$$\begin{cases} \omega_s^2 = \frac{k_s}{m_s}, \omega_{t1}^2 = \frac{k_{t1}}{m_{t1} + b_1}, \omega_{t2}^2 = \frac{k_{t2}}{m_{t2} + b_2}, f_{t1} = \frac{\omega_{t1}}{\omega_b}, f_{t2} = \frac{\omega_{t2}}{\omega_b}, \omega_T = \frac{\omega_{t1} + \omega_{t2}}{2} \\ \xi_{t1} = \frac{c_{t1}}{2(m_{t1} + b_1)\omega_{t1}}, \xi_{t2} = \frac{c_{t2}}{2(m_{t2} + b_2)\omega_{t2}}, \xi_s = \frac{c_s}{2m_s\omega_s}, \xi_T = \frac{c_T}{2(m_{t1} + m_{t2} + b_1 + b_2)\omega_T} \\ \mu_{t1} = \frac{m_{t1}}{M}, \mu_{t2} = \frac{m_{t2}}{M}, \mu_1 = \frac{m_{t1} + m_{t2}}{M}, \mu_b = \frac{m_b}{M}, \beta_{t2} = \frac{b_2}{M}, \nu = \frac{b_1}{b_2}, \beta_1 = \frac{b_1 + b_2}{M}, \lambda = \frac{m_{t1}}{m_{t2}}, \beta_{t1} = \frac{b_1}{M} \end{cases}$$

对 BIS+TTMDI 混合隔震体系,优化目标定义为:使隔震层位移方差最小:

$$\min .R = \min_L (\sigma_{x_n}^2) \text{ s.t. } L_{lb} \leq L \leq L_{ub} \quad (14)$$

式中 $L = [f_{t1} \ f_{t2} \ \xi_{t1} \ \xi_{t2} \ \xi_T \ \eta_1]$, L_{lb} 为参数取值下界, L_{ub} 为参数取值上界, $\sigma_{x_n}^2$ 表示隔震层位移方差。min .R 值越小,说明 BIS+TTMDI 体系对隔震层位移的控制效果越好。

2.2 BIS+TTMDI 混合隔震体系参数界定

基础隔震体系和地震动模型参数设置如下:假定上部结构为七层框架结构,阻尼比 $\xi_s = 0.02$,周期为 0.7 s;隔震支座黏滞阻尼比 $\xi_b = 0.1$,隔震支座屈服位移 $q = 0.015$ m,隔震支座屈服后与屈服前刚度比 $\alpha = 0.1$,屈重比 $F_0 = 0.05$,模拟隔震层非线性行为的 Bouc-Wen 模型相关参数 A, γ, β 和 η 分别取为 1, 0.5, 0.5 和 1^[8];隔震层及上部结构各层质量和刚度如表 1 所示。关于阻尼的构造,通过刚度比例阻尼进行计算^[17-19]。对于坚硬场地, Kanai-Tajimi 模型参数设定如下^[6]:覆盖土层特征频率 $\omega_g = 15$ rad/s,特征阻尼比 $\xi_g = 0.6$,用于调整 Kanai-Tajimi 谱的滤波器参数 $\omega_f = 1.5$ rad/s, $\xi_f = 0.6$,以及输入白噪声谱

$$B\Gamma + \Gamma B^T + D = 0 \quad (13)$$

式(13)为李雅普诺夫方程,使用 MATLAB 进行求解,每个响应方差分别对应于 Γ 对角线上的每个元素,等效线性系数可以通过求解响应协方差矩阵得到。但 B 包含等效线性系数,因此需要进行迭代求解 Γ ,直到满足一定的收敛准则。

引入变量:

强度 $S_0 = 0.05$ m²/s³,根据式(10)计算出相应的 $PGA = 0.379g_0$ 。

表 1 某七层基础隔震结构的质量及刚度系数

Tab. 1 Mass and stiffness coefficients of a seven-storey base isolated structure

层数	质量/kg	刚度/(kN·m ⁻¹)	
隔震层	50000	屈服前:13333	屈服后:1333.3
1	50000	91385	
2	50000	91385	
3	50000	91385	
4	50000	91385	
5	50000	91385	
6	50000	91385	
7	50000	91385	

BIS+TTMDI 混合隔震体系的目标函数求解复杂,选择合适的优化算法有利于节省计算资源和提高计算效率。模式搜索算法是一种解决最优问题的直接搜索算法,它按照固定模式和步长进行探索移动,去寻求函数下降的最佳方向,逐步逼近最优点,进而求得最优解。根据 BIS+TTMDI 体系的最优评价准则,采用模式搜索法进行参数优化,图 2 给出了 BIS+TTMDI 体系的具体优化过程。表 2 给

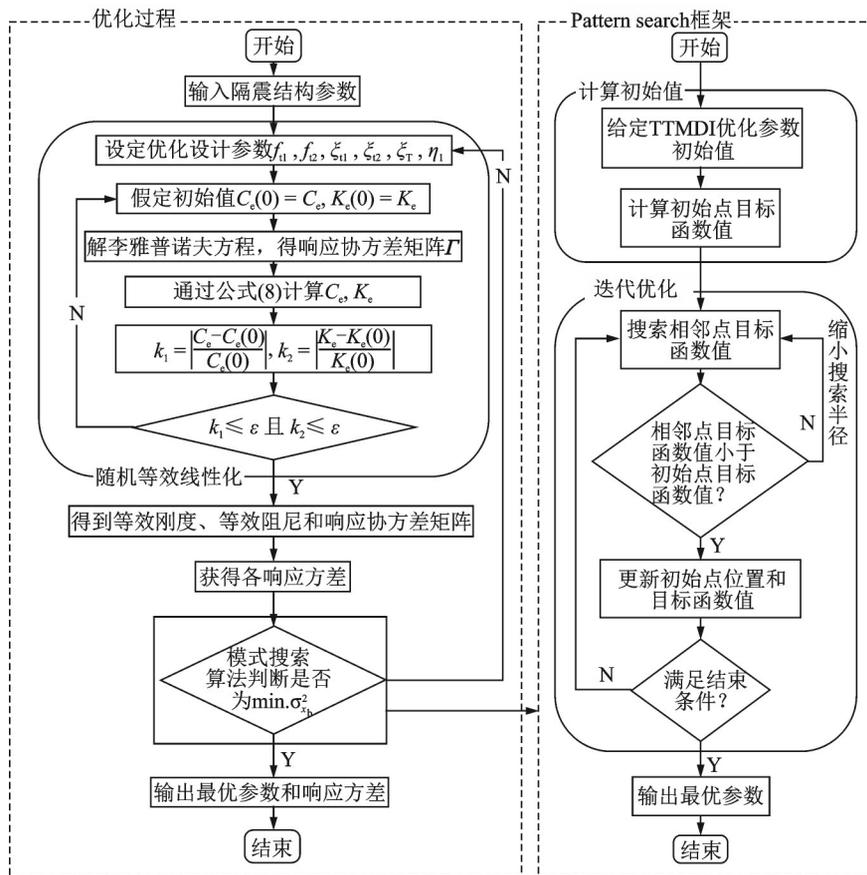


图 2 BIS+TTMDI体系的优化设计过程

Fig. 2 Optimal design process of the BIS+TTMDI system

出优化参数和相关参数取值范围。这里值得说明的是: BIS+TMD 体系为 BIS+TTMDI 体系在 $\beta_1 = 0$

时的特殊情况, BIS+TTMD 体系为 BIS+TTMDI 体系在 $\beta_1 = 0$ 时的特殊情况。

表 2 优化参数和相关参数的取值范围

Tab. 2 Value ranges of the parameters to be optimized and related parameters

参数	范围或取值
$L_{lb} = [f_{t1} \ f_{t2} \ \xi_{t1} \ \xi_{t2} \ \xi_T \ \eta_1]^{min}$	[0.1 0.1 0 0 0 0]
$L_{ub} = [f_{t1} \ f_{t2} \ \xi_{t1} \ \xi_{t2} \ \xi_T \ \eta_1]^{max}$	[2 2 0.999 0.999 0.999 2]
质量块总质量比 μ_1	$\mu_1 = 0.001, 0.005, 0.01$
总惯容质量比 β_1	$0 \leq \beta_1 \leq 0.2, \Delta\beta_1 = 0.05$
TMD1 和 TMD2 的质量比 λ	$\lambda = 1$

3 BIS+TTMDI 混合隔震体系的性能

3.1 鲁棒性

在真实地震中,由于结构特性的变化或对控制装置参数认识不准确, BIS+TTMDI 体系可能会出现“失谐效应”。其中,有研究表明隔震层参数的变化是引起控制装置失谐的主要原因之一。为此,当质量化取一定值时,考虑隔震层刚度比不同取值,分别对 TTMDI 的最优刚度及最优连接阻尼值进行均匀地缩,通过 BIS+TTMDI 体系控制有效性相对最

优值的变化来评估该体系的鲁棒性。缩放比例为 80%~120%。为了便于比较,定义鲁棒性评价指标^[20]:

$$R = \frac{\sigma_{x_{b,n}}^2 - \sigma_{x_{b,k}}^2}{\sigma_{x_{b,k}}^2} \quad (15)$$

式中 $\sigma_{x_{b,k}}^2$ 为原 TTMDI 参数 $k_{t1opt}, k_{t2opt}, c_{Topt}$ 情况下得到的最小隔震层位移方差。而 $\sigma_{x_{b,n}}^2$ 为仅改变 TTMDI 参数而 BIS 参数不变情况下求得的最小隔震层位移方差。即用扰动后隔震层位移方差相对于其最优值的增量来衡量外界条件发生变化时控制系统有效性的降低程度^[20]。R 越小,有效性降低程度越

小,即BIS+TTMDI体系的鲁棒性越强。

图3给出了 $\beta_1=0.2, \mu_t=0.001, 0.005, 0.01$ 时,不同 α 情况下 R 随缩放比例($k_{11}/k_{11opt}, k_{12}/k_{12opt}, c_T/c_{Topt}$)的变化趋势。值得一提的是, α 可以代表隔震层的非线性程度,即 $\alpha=0.1$ 为强非线性, $\alpha=1.0$ 为线性。由图3可知:分别对刚度 k_{11} 和 k_{12} 摄动,其缩放比例越接近100%(最优值)时, R 越小。然而对连接阻尼摄动, R 几乎不随 c_T/c_{Topt} 变化。整体来看,BIS+TTMDI对阻尼摄动的鲁棒性最强,例如 $\mu_t=0.01, k_{11}/k_{11opt}, k_{12}/k_{12opt}, c_T/c_{Topt}=0.8$ 时,对应的刚度1、刚度2、阻尼变化的 R 分别为:15.97%, 6.19%,

0.42% ($\alpha=0.1$); 29.41%, 11.16%, 0.66% ($\alpha=0.25$); 47.38%, 14.28%, 0.88% ($\alpha=0.5$); 81.40%, 20.50%, 1.17% ($\alpha=1.0$)。可以看出阻尼摄动下, R 随隔震层刚度比 α 的变化不明显,而 α 对刚度影响显著,且BIS+TTMDI对阻尼和刚度摄动的鲁棒性会随着 α 值的减小而增强。换言之,非线性($\alpha=0.1$)隔震层下BIS+TTMDI体系的鲁棒性显著强于线性($\alpha=1.0$)隔震层下BIS+TTMDI的鲁棒性。这一结论证实TTMDI用于非线性隔震层研究的必要性。为了贴合实际工程应用,后续着重讨论不同混合隔震体系在 $\alpha=0.1$ 时的减/隔震性能。

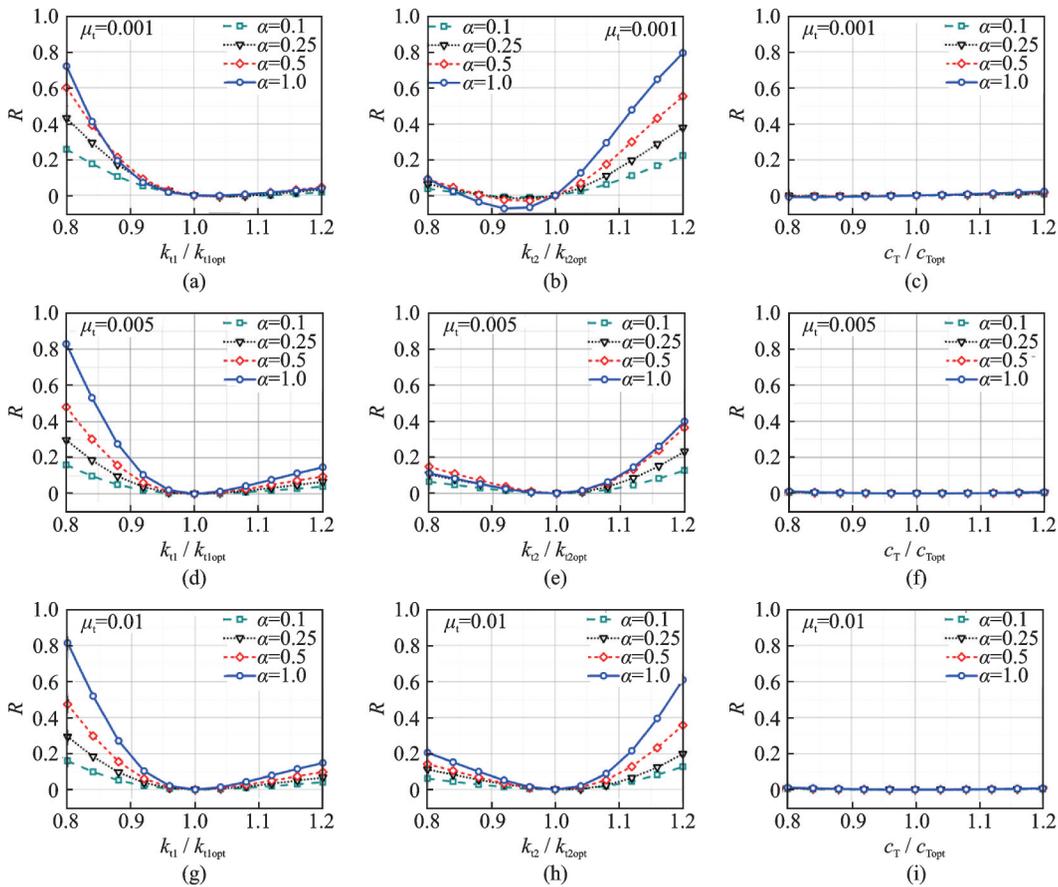


图3 对于不同 μ_t 和 α 值,BIS+TTMDI体系对TTMDI摄动的鲁棒性

Fig. 3 For different values of μ_t and α , robustness of BIS+TTMDI system to TTMDI perturbation

3.2 减/隔震效果

图4给出了 $\mu_t=0.001, 0.01$ 时,BIS+TMDI和BIS+TTMDI体系的最小化隔震层位移方差($\min .R$)随 β_1 的变化情况。从图中可以看出,在相同 μ_t 和 β_1 下,BIS+TTMDI体系对隔震层位移的控制效果优于BIS+TMDI体系。增大质量块总质量 μ_t ,BIS+TTMDI及BIS+TMDI的减震效果提升不明显,当 μ_t 值一定时,BIS+TTMDI和BIS+TMDI体系的减震效果随总惯容质量比 β_1

的增加显著提高,其主要原因在于惯容器在控制体系中增加了虚拟质量,极大提高了其有效惯容质量,从而获得良好的减震效果。值得注意的是,增大 μ_t ,BIS+TTMDI及BIS+TMDI减震效果的提升不明显,而增大 β_1 仍可以有效提高装置的减震效果。因此,适当的惯容质量可以使BIS+TTMDI保持较高减震效果的同时,进一步减少质量块对物理质量的需求,从而达到减震装置的轻质化。

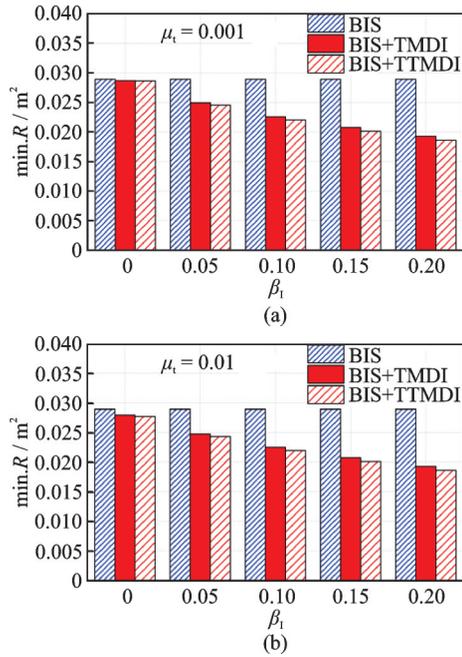


图 4 在不同的 μ_1 下,最小化隔震层位移方差 $\min. R$ 随 β_1 的变化
 Fig. 4 Variation of minimum displacement variance of the isolation layer $\min. R$ versus β_1 for different values of μ_1

3.3 TTMDI体系的最优刚度和最优阻尼

根据上文提出的 BIS+TTMDI 优化设计方法,图 5 给出了对于不同的 μ_1 , TTMDI 和 TMDI 的最优阻尼系数随 β_1 的变化趋势。值得一提的是:TMD1 和 TMD2 的最优阻尼系数均为零,从而没有给出与 c_{11} 和 c_{12} 相关的图。其主要原因是 TMD1 和 TMD2

所需的阻尼通过其连接阻尼 c_T 来实现,使得 TTMDI 处于最优状态,因此大大地简化了系统。此外,TTMDI 所需的总阻尼随 β_1 和 μ_1 的增大而增大。

图 6 给出了对于不同的 μ_1 , TTMDI 最优刚度随 β_1 的变化趋势。从图 6 可以看出:TTMDI 的 k_{11} 和 k_{12} 随 β_1 和 μ_1 的增大而增大,表明在 TTMDI 中 TMD1 和 TMD2 的刚度同时起到调谐作用,且 TMD2 刚度作用大于 TMD1 刚度。TTMDI 的总刚度需求高于 TMDI 的刚度需求。

3.4 TTMDI的冲程行为

由于在基础隔震结构中安装 TTMDI 的空间是有限的,所以在实际工程中必须考虑 TTMDI 体系中质量块的冲程。为了评估和比较混合隔震体系中 TTMDI 相对隔震层的位移(冲程),图 7 给出了 TTMDI, TTMD, TMDI 和 TMD 质量块冲程方差随 $\beta_1-\mu_1$ 的变化趋势。由图 7 可以看出:由于惯容器的作用,TTMDI 体系中质量块的冲程随 β_1 的增大而显著减小;与此同时,TTMDI 体系中 TMD1 和 TMD2 质量块的冲程比较接近,例如:质量比为 0.01,惯容比为 0.02 时,TMD1 质量块的冲程方差为 0.48234 m^2 ,TMD2 质量块的冲程方差为 0.47789 m^2 。因此对结构空间需求小。当 β_1 值一定时, $\mu_1 = 0.001$ 的 TTMDI 中质量块的冲程大于 $\mu_1 = 0.005$ 和 $\mu_1 = 0.01$ 的 TTMDI 中质量块的冲程,这意味着 μ_1 越大,TTMDI 体系中质量块的冲程越小。值得注意的

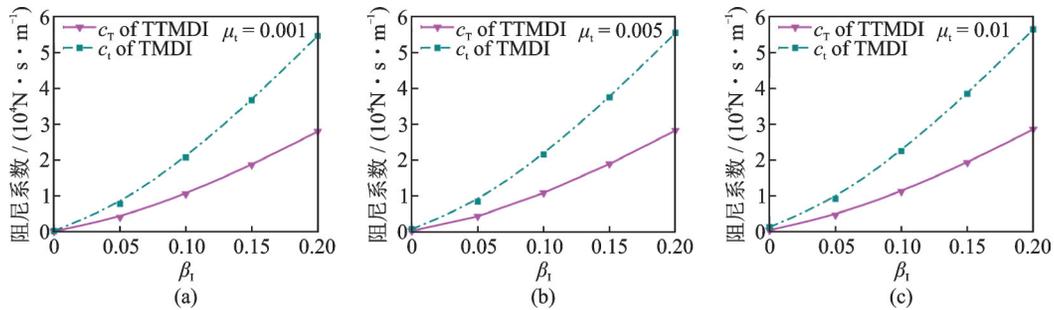


图 5 对于不同的 μ_1 , TTMDI 和 TMDI 最优阻尼系数随 β_1 的变化趋势

Fig. 5 Variation of the optimal damping coefficients of TTMDI and TMDI versus β_1 for different values of μ_1

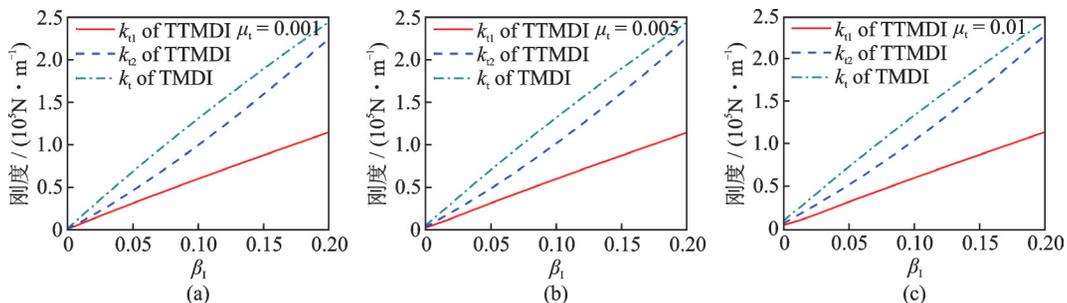


图 6 对于不同的 μ_1 , TTMDI 和 TMDI 最优刚度随 β_1 的变化

Fig. 6 Variation of the optimal stiffness of TTMDI and TMDI versus β_1 for different values of μ_1

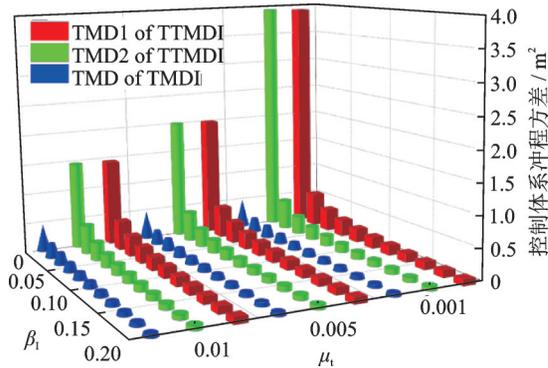


图 7 控制系统冲程方差随 $\beta_1-\mu_1$ 的变化

Fig. 7 Variation in variances of control system strokes versus $\beta_1-\mu_1$

是:当 $\beta_1 \geq 0.05$ 时,对于不同的 μ_1 和 β_1 组合,TTMDI 体系的质量块冲程差别不大。TTMDI 的冲程与 TMDI 比较接近,但都远小于 TTMD 和 TMD 的冲程。此外,在实际工程中,为 TTMDI 装置设置合适的 μ_1 和 β_1 ,不仅可以获得较好的减震效果,而且还可以将 TTMDI 的冲程控制在合理范围内。

3.5 地震频率对 BIS+TTMDI 体系性能的影响

为了考虑地震频率成分对 BIS+TTMDI 体系性能的影响,引入频率比 $\Psi = \omega_g / \omega_b$,则可以根据地震激励的类型对 BIS+TTMDI 的最优参数和性能进行评价: $\Psi = 1$ 代表可能发生共振的条件, $\Psi < 1$ 代表比 BIS 软的场地条件, $\Psi > 1$ 表示比 BIS 硬的场地条件。为了定量表示安装 TTMDI 后对隔震层位移的控制效果,引入隔震层位移控制有效性指标 J_{rb} ,表示为:

$$J_{rb} = \frac{\sigma_{x_{b,k}}^2}{\sigma_{x_{b,0}}^2} \quad (16)$$

式中 $\sigma_{x_{b,k}}^2$ 表示受控结构隔震层的位移方差;而 $\sigma_{x_{b,0}}^2$ 表示无控结构隔震层的位移方差。 J_{rb} 值越小,则表明 BIS+TTMDI 体系控制效果越好。

图 8 给出了频率比对混合隔震体系的影响。在共振条件 $\Psi \rightarrow 1$ 时,注意到 BIS+TMD 和 BIS+TTMD 的 $J_{rb} > 1$,出现放大位移需求的情况,BIS+TTMDI 的性能依然优于 BIS+TMDI,体现出该体系的高性能。在 $\Psi > 1.5$ 时,TTMDI 的最优参数 ω_{t1} , ω_{t2} 和 ξ_T 几乎与地震无关,而且 $\Psi > 1.5$ 的这个频率范围在实际应用中相当普遍。这一优势在实际应用中是非常重要的,因为在一个特定的安装地点,实际的地震激励不一定与优化设计过程中的假设一致,可能会受到断层距离和接近程度的影响。然而 TTMDI 装置的最优参数在很大的范围内几乎是恒定

的,说明该装置控制性能对地震频率成分敏感性较低,不易产生失谐效应。

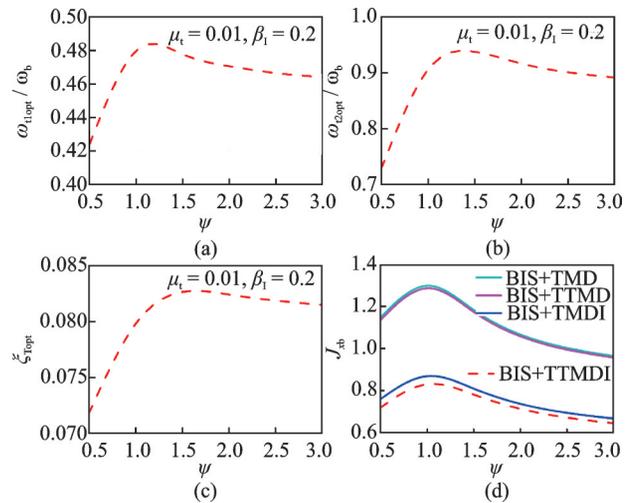


图 8 地震频率成分对 BIS+TTMDI 体系性能的影响

Fig. 8 Influence of earthquake frequency components on the performance of the BIS+TTMDI system

4 BIS+TTMDI 混合隔震体系的动力弹塑性分析

根据前面所述的优化设计方法,给出控制装置具体设计参数为: $\mu_t = 0.01$, $\beta_t = 0.2$, $f_{t1} = 0.4609$, $f_{t2} = 0.8782$, $\xi_{t1} = 0$, $\xi_{t2} = 0$, $\xi_T = 0.0808$, $\eta_1 = 1.8699$ (TTMDI); $\mu_t = 0.01$, $\beta_t = 0.2$, $f_{t1} = 0.5425$, $\xi_{t1} = 0.1972$ (TMDI)。仍选用第 2.2 节中某七层混合基础隔震体系为算例,隔震层及上部结构相关参数的设置与 2.2 节中一致。背景工程的抗震设防烈度为 8 度,设计地震分组为第二组,II 类场地,通过七条近场地震动进一步验证 BIS+TTMDI 混合隔震体系的减/隔震性能。地震动参数信息如表 3 所示。图 9 给出了地震波加速度反应谱,图中 T 表示结构自振周期。

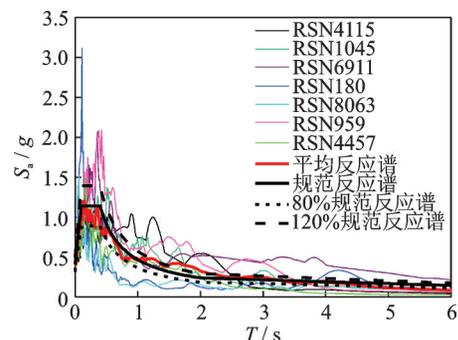


图 9 地震波加速度反应谱

Fig. 9 Acceleration response spectrum of seismic waves

表 3 近场地震波信息

Tab. 3 Information about near-field earthquake wave

编号	地震波	记录站	年份	震级	震中距/km	脉冲周期 T_p/s	PGA/g
RSN4115	Parkfield-02_CA	Parkfield-Fault Zone 12	2004	6.0	10.7	1.19	0.276
RSN1045	Northridge-01	Newhall-W Pico Canyon Rd	1994	6.69	21.5	2.98	0.419
RSN6911	Darfield_New Zealand	HORC	2010	7.0	13.0	9.92	0.450
RSN180	Imperial Valley-06	El Centro Array #5	1979	6.53	23.1	4.13	0.594
RSN8063	Christchurch_New Zealand	Christchurch Botanical Gardens	2011	6.2	7.5	—	0.553
RSN959	Northridge-01	Canoga Park-Topanga Can	1994	6.69	6.0	—	0.358
RSN4457	Montenegro_Yugoslavia	Ulcinj-Hotel Albatros	1979	7.1	16.3	—	0.183

4.1 隔震层位移峰值响应

表 4 给出了各体系在近场地震作用下的隔震层峰值响应。从表 4 可以看出,各体系在不同地震作用下的减震效果有所差异,主要是丰富的地震频率所引起的。除此以外,相对 BIS 体系而言,近场脉冲型地震波 (RSN4115, RSN1045, RSN6911, RSN180) 作用下 BIS+TTMDI 体系的控制效果比

BIS+TMDI 体系略高 (5% 以内); 在近场非脉冲地震 (RSN8063, RSN959, RSN4457) 中, BIS+TTMDI 体系相较于 BIS+TMDI 体系的控制效果更为显著, 比如, RSN8063 作用下, BIS+TTMDI 的位移减幅为 30.80%, BIS+TMDI 的位移减幅为 19.44%, 前者的控制效果比后者高出 11.36%。这一现象说明 BIS+TTMDI 体系在近场地震中能更有效地控制隔震层位移。

表 4 近场地震作用下各体系的隔震层位移峰值响应 (单位: m)

Tab. 4 Peak displacement response of the seismic isolation layer for different systems under near-field seismic excitation (Unit: m)

控制体系	地震波							平均值
	RSN4115	RSN1045	RSN6911	RSN180	RSN8063	RSN959	RSN4457	
BIS	0.1884	0.5243	0.3730	0.0541	0.1656	0.1193	0.1484	0.2247
BIS+TTMDI	0.1629	0.4270	0.2909	0.0460	0.1146	0.0853	0.1186	0.1779
位移减震率	13.54%	18.55%	21.99%	15.08%	30.80%	28.50%	20.08%	20.84%
BIS+TMDI	0.1747	0.4408	0.3002	0.0490	0.1334	0.0999	0.1238	0.1888
位移减震率	7.29%	15.94%	19.50%	9.44%	19.44%	16.26%	16.58%	15.98%

注: 位移减震率 = $(1 - \text{受控结构隔震层位移峰值} / \text{无控结构隔震层位移峰值}) \times 100\%$ 。

4.2 上部结构位移和加速度峰值响应

图 10 给出了地震作用下各体系的上部结构的位移和加速度响应。从图 10(a) 中可以看出, 相对

BIS 体系而言, BIS+TTMDI 体系可以显著减少上部结构的相对位移; BIS+TMDI 体系对上部结构相对位移的控制不显著。除此以外还发现, 上部结构相对位移是显著小于隔震层位移的, 其主要原因是隔震层和控制装置 (TTMDI 或 TMDI) 协同作用起到良好的耗能效果, 使得传到上部结构的能量较少。从前面的分析内容可知, BIS+TTMDI 体系能较好地控制位移响应。为了进一步考虑上部结构设备及设施的安全性, 还需对上部结构的楼层绝对加速度进行分析。图 10(b) 给出了地震作用下各体系的楼层平均绝对加速度响应。从图 10(b) 中可以看出, 相对 BIS 而言, BIS+TTMDI (TMDI) 皆能抑制上部结构绝对加速度的放大, 且 BIS+TTMDI 体系的控制效果更优。这一特性使得 BIS+TTMDI 具备较好的工程应用前景。

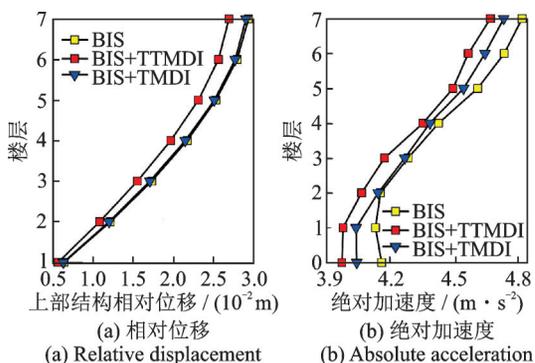


图 10 上部结构响应 (注: “0” 代表隔震层)

Fig. 10 Dynamic response of the superstructure (Note: “0” represents the isolation layer)

4.3 隔震支座的滞回耗能特征

为了从能量的角度解释 BIS+TTMDI(TM-DI)能有效减少地震响应的原因。图 11 给出了地震作用下各体系的隔震支座滞回曲线,限于篇幅,仅以 RSN6911(近场脉冲型)和 RSN959(近场非脉冲型)为例。从图 11 可以看出,BIS+TTMDI 和 BIS+TMDI 体系中的滞回曲线面积小于 BIS 体系,说明隔震支座与控制装置 TTMDI/TMDI 达到了协同耗能的效果。除此以外还发现,BIS+TTMDI 中隔震层的滞回面积小于 BIS+TMDI 体系,意味着 TTMDI 承担的耗能更多,即隔震层的位移需求显著减少,从而达到保护隔震支座的目的。

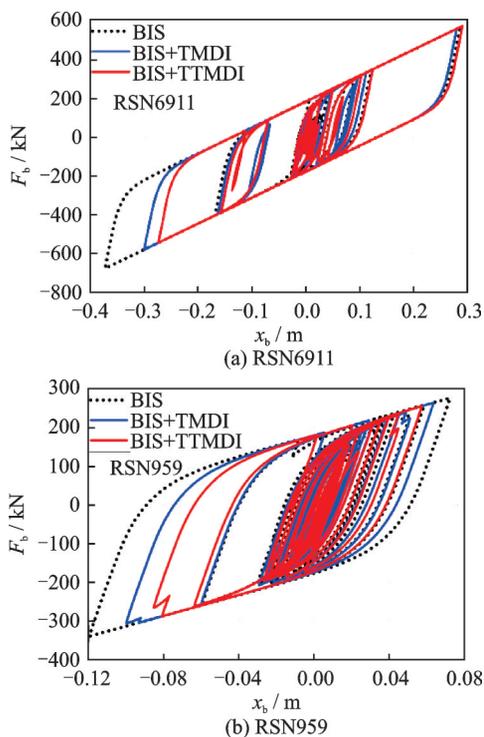


图 11 各体系隔震支座滞回曲线

Fig. 11 Hysteresis curves of isolation bearings for different systems

5 结 论

考虑强震下特别是近断层地震动作用下隔震层非线性的实际情况,在频域内体现了 BIS+TTMDI 混合隔震体系的减隔震性能,时域动力弹塑性分析进一步验证了 BIS+TTMDI 混合隔震体系的优越性能,为工程应用提供了依据。得出的主要结论如下:

(1) BIS+TTMDI 混合隔震体系的鲁棒性在非线性的隔震层情况下显著强于线性情况。

(2) 在惯容质量和质量块质量相同时,TTMDI 系统对总阻尼的需求不到 TMDI 系统的一半,且隔

震效果更好,因而更为经济实用。

(3) TTMDI 系统冲程与 TMDI 系统冲程接近,远小于 TTMD 系统和 TMD 系统冲程,因而更易于工程应用。

(4) 当场地土层与隔震结构的频率比大于 1.5 时,TTMDI 系统参数对地震频率的敏感性降低,且保持着良好的控制性能。

(5) BIS+TTMDI 和 BIS+TMDI 混合隔震体系能有效地减小隔震层位移需求,其中 BIS+TTMDI 混合隔震体系的有效性最好。

参考文献:

- [1] Kelly J M, Naeim F. The role of damping in seismic isolation[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1999, 28(1): 3-20.
- [2] 陈瑞生, 吴进标, 刘彦辉, 等. 黏滞阻尼器-基础隔震混合体系优化研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(11): 93-100.
CHEN Ruisheng, WU Jinbiao, LIU Yanhui, et al. Optimization research for base-isolated structures with fluid viscous dampers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(11): 93-100.
- [3] Taniguchi T, Der Kiureghian A, Melkumyan M. Effect of tuned mass damper on displacement demand of base-isolated structures[J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(12): 3478-3488.
- [4] Petti L, Giannattasio Giovanni, De Luliis M, et al. Small scale experimental testing to verify the effectiveness of the base isolation and tuned mass dampers combined control strategy[J]. *Smart Structures and Systems*, 2010, 6(1): 57-72.
- [5] Tsai H C. The effect of tuned-mass dampers on the seismic response of base-isolated structures[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1995, 32(8-9): 1195-1210.
- [6] De Angelis M, Giaralis A, Petrini F, et al. Optimal tuning and assessment of inertial dampers with grounded inerter for vibration control of seismically excited base-isolated systems[J]. *Engineering Structures*, 2019, 196: 109250.
- [7] De Domenico D, Ricciardi G. Improving the dynamic performance of base-isolated structures via tuned mass damper and inerter devices: a comparative study[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(10): e2234.
- [8] De Domenico D, Ricciardi G. Optimal design and seismic performance of tuned mass damper inerter (TMDI) for structures with nonlinear base isolation systems[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2018, 47(12): 2539-2560.
- [9] De Domenico D, Ricciardi G. An enhanced base isolation system equipped with optimal tuned mass damper

- inerters (TTMDI)[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2018, 47(5): 1169-1192.
- [10] Li Chunxiang, Chang Ke, Cao Liyuan, et al. Performance of a nonlinear hybrid base isolation system under the ground motions[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 143: 106589.
- [11] Cao Liyuan, Li Chunxiang. A high performance hybrid passive base-isolated system[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2022, 29(3): e2887.
- [12] Soto-Brito R, Ruiz S E. Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1999, 28(11): 1255-1272.
- [13] Sgobba S, Marano G C. Optimum design of linear tuned mass dampers for structures with nonlinear behavior[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2010, 24(6): 1739-1755.
- [14] Hessabi R M, Mercan O, Ozturk B. Exploring the effects of tuned mass dampers on the seismic performance of structures with nonlinear base isolation systems[J]. *Earthquakes and Structures*, 2017, 12(3): 285-296.
- [15] Jangid R S. Stochastic response of building frames isolated by lead-rubber bearings[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2010, 17(1): 1-22.
- [16] Kiureghian A D, Neuenhofer A. Response spectrum method for multi-support seismic excitations[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 21(8): 713-740.
- [17] Ryan K L, Polanco J. Problems with Rayleigh damping in base-isolated buildings[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(11): 1780-1784.
- [18] Pant D R, Wijeyewickrema A C, Elgawady M A. Appropriate viscous damping for nonlinear time-history analysis of base-isolated reinforced concrete buildings[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2013, 42(15): 2321-2339.
- [19] Anajafi H, Medina R A, Santini-Bell E. Effects of the improper modeling of viscous damping on the first-mode and higher-mode dominated responses of base-isolated buildings[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2020, 49(1): 51-73.
- [20] 赵祥昇, 李春祥, 曹黎媛. 结构-NFVD-TTMDI的控制性能[J]. *振动工程学报*, 2022, 35(1): 55-63.
ZHAO Xiangsheng, LI Chunxiang, CAO Liyuan. Control performance of structure-NFVD-TTMDI[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2022, 35(1): 55-63.

Optimal design and seismic performance of hybrid base isolation system

LI Chun-xiang, LONG Qiu-yu, CAO Li-yuan

(Department of Civil Engineering, School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In order to cope with excessive displacement requirements of the isolation layer in the base isolated structure, a hybrid isolation system is proposed in this paper through the base isolated system (BIS) + tuned tandem mass dampers-inerters (TTMDI). The Bouc-Wen hysteretic model is used to simulate the nonlinear force-deformation behaviors of the isolation layer. Employing the stochastic equivalent linearization, pattern search optimization algorithm, as well as the earthquake ground motion model simultaneously, the optimum design framework of the BIS+TTMDI system is established in the frequency domain. The performance of the BIS+TTMDI system is systematically evaluated in terms of its robustness, effectiveness, stiffness and damping coefficient, stroke and sensitivity to seismic frequency contents, and compared with BIS + the tuned mass damper (TMD), tandem tuned mass damper (TTMD), and tuned mass damper-inerter (TMDI), respectively. The dynamic elasto-plastic analysis of a seven story hybrid base-isolated system, respectively including the BIS+TTMDI and BIS+TMDI systems, is carried out under the near-field earthquake ground motions. The results show that the BIS+TTMDI system has the best seismic performance and strong robustness. Furthermore, the total damping requirement of the TTMDI in the BIS+TTMDI system is less than half of the TMDI in the BIS+TMDI system, which is more economical and practical.

Key words: hybrid base isolation; structural vibration control; optimum design; equivalent linearization; dynamic elasto-plastic analysis

作者简介: 李春祥(1964—),男,博士,教授。E-mail: Li-chunxiang@vip.sina.com。

通讯作者: 曹黎媛(1991—),女,博士,讲师。E-mail: caoly@shu.edu.cn。