

TLCD-基础隔震框架结构的减振控制研究*

符川, 肖怡凡

(北方工业大学土木工程学院 北京, 100144)

摘要 为了避免和减轻由过大隔震层位移引起的损害,对基础隔震框架结构装设调频液柱阻尼器(tuned liquid column damper, 简称 TLCD)后混合系统的减振效果进行研究。建立了单层和多层混合控制系统在地震作用下的运动方程,采用 TLCD-结构体系转化为调频质量阻尼器(tuned mass damper, 简称 TMD)-结构体系的等效方法,利用 TMD 参数优化公式,得到单个 TLCD 初始设计参数,并采用状态空间方程得到多个 TLCD 最优设计参数。通过对某 8 层基础隔震结构进行模拟,证明了该理论设计方法的合理性。该混合结构不仅可以减小隔震层位移和加速度,而且对上部结构位移和加速度反应都能更有效的控制。

关键词 调频液柱阻尼器; 框架结构; 基础隔震; 参数优化; 混合控制

中图分类号 TU352.11; TU352.12

引言

当建筑物遭受强震时,单一的减隔震手段已不能确保建筑物的安全,将减震与隔震技术结合的混合控制系统能实现更好的减震效果。基础隔震和在结构顶层加装 TMD 有利于减小上部结构的层间位移。李慧等^[1]分析了混合控制体系在平稳随机地震作用下的响应,得到不同场地上的结构,说明该混合控制体系有一定的减震效果。王亚楠等^[2]研究了该混合系统在近场地震作用下的能量响应与减震效果。张文芳等^[3]在顶部 TMD 系统中采用隔震部件,利用橡胶支座提供恢复力,并利用滑动摩擦支座提供阻尼耗能来适应局部大变形的要求。

采用基础隔震使上部结构位移和加速度大大减小,但基础隔震子系统会发生较大位移。为了减少隔震层位移,常见方法是在隔震层提供附加阻尼,这可能会增加上部结构的层间位移和加速度,因此研究人员考虑采用安装 TMD 来提高基础隔震系统的性能。研究表明,TMD 控制效果更好,不仅减小了层间剪力,还减小了隔震层位移需求^[4-5]。TLCD 减振原理与 TMD 类似,适用于基本固有频率低并占主导地位的结构,如基础隔震结构。TLCD 具有经济、简单易行、维护费用低及使用液体作为供水时无需添加额外质量等特点,可替代其他机械减振装置。文献^[6-7]

研究了基础隔震结构底层安装 TLCD 的减震性能,并进行了 3 层剪切框架试验来验证混合体系的有效性。但这些文献没有给出 TLCD 明确的设计方案。

笔者研究了 TLCD 对基础隔震-多层剪切框架结构在地震作用下的减振效果,建立了单层和多层混合控制系统的动力方程。采用 TLCD-结构体系转化为 TMD-结构体系的方法,利用文献^[8]提出的 TMD 参数优化公式,转化得到 TLCD 设计参数,并利用状态空间方程设计多个 TLCD 参数。以某 8 层基础隔震钢筋混凝土框架结构为例,对结构顶、底层安装 TLCD 前后的地震响应进行分析。

1 结构运动方程

1.1 单层剪切框架

基础隔震结构安装 TLCD 混合体系由隔震层、上部结构和 TLCD 3 部分组成。以单层平面框架为例,设该层下半墙体的质量和隔震层的质量为 m_b ;该层上半墙体的质量为 m_1 ; k_b, c_b 分别为隔震层水平刚度和阻尼系数; k_1, c_1 分别为上部结构的水平刚度和阻尼。TLCD 由装有液体的等截面刚性管柱组成, B 为水平管段的液柱长度, H 为两侧竖向管段液柱长度, u 为 TLCD 中液体沿管壁运动时的相对位移。基础隔震-底层安装 TLCD 单层剪切模型如图 1 所示。

* 国家自然科学基金资助项目(51608010);北京市教委科技计划一般资助项目(KM201810009011);北方工业大学毓优人才支持计划资助项目(107051360019XN134/019);北京市属高校基本科研业务费资助项目(110052971921/064)
收稿日期:2019-08-14;修回日期:2019-10-10

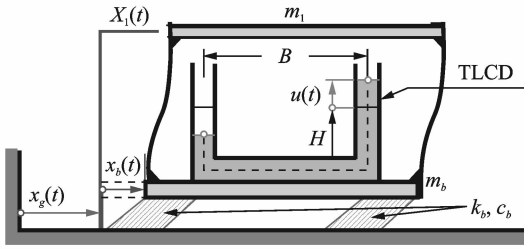


图 1 基础隔震-底层安装 TLCD 单层剪切模型

Fig. 1 Base-isolated single story shear frame equipped with TLCD

阻尼器管道中的理想液体运动方程可由广义贝努利方程建立

$$\ddot{u} + 2\zeta_A \omega_A \dot{u} + \omega_A^2 u = -\kappa(\ddot{x}_g + \ddot{x}_b) \quad (1)$$

其中: $\kappa = B/L$; $L = B + 2H$; $\omega_A = \sqrt{2g/L}$; 线性阻尼比 $\zeta_A = (4/3\pi)U_{\max}\delta_L$; U_{\max} 为 TLCD 振动幅值; $\delta_L = \lambda/(2L_{\text{eff}})[1/m]$ 为水头损失系数; λ 为与雷诺数有关的沿程阻尼系数。

根据达朗贝尔原理,得到上部结构运动方程为

$$m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_g) + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) + k_1(x_1 - x_b) = 0 \quad (2)$$

隔震层运动方程为

$$m_b(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g) + c_b \dot{x}_b + k_b x_b + m_f(\ddot{x}_b + \ddot{x}_g + \kappa \ddot{u}) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_b) - k_1(x_1 - x_b) = 0 \quad (3)$$

其中: m_f 为 TLCD 管柱内液体质量; \ddot{x}_g 为地震水平加速度; $x_b, \dot{x}_b, \ddot{x}_b$ 分别为隔震层相对基础水平位移、速度和加速度; $x_1, \dot{x}_1, \ddot{x}_1$ 分别为上部结构相对地面的位移、速度和加速度。

1.2 多层剪切框架

多、高层隔震建筑在地震作用下,上部结构会产生剪切为主的变形,该类隔震结构宜采用多质点层间剪切模型,如图 2 所示。其中: $m_1 \sim m_n, k_1 \sim k_n$ 和 $c_1 \sim c_n$ 分别为上部结构的各楼层质量、刚度和阻尼系数。

首层的运动方程为

$$m_1 \ddot{x}_1 - c_1 \dot{x}_b + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 - k_1 x_b + (k_1 + k_2) x_1 - k_2 x_2 = -m_1 \ddot{x}_g \quad (4)$$

隔震层运动方程由式(3)变为

$$(m_b + m_f) \ddot{x}_b + (c_b + c_1) \dot{x}_b - c_1 \dot{x}_1 + (k_b + k_1) x_b - k_1 x_1 + m_f \kappa \ddot{u} = -(m_b + m_f) \ddot{x}_g \quad (5)$$

将各层的运动方程整理为矩阵形式,则基础隔震系统的水平运动方程为

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K} \mathbf{x} = -\mathbf{M} \mathbf{r}_s \ddot{x}_g + \mathbf{s} \mathbf{F}_z \quad (6)$$

其中: $\mathbf{M} = \text{diag}(m_b, m_1, \dots, m_{n-1}, m_n)_{(n+1) \times (n+1)}$, 为主结构的质量矩阵; $\mathbf{s} = [1, \dots, 0, \dots, 0]^T$; $\mathbf{F}_z = -m_f(\ddot{x}_g + \mathbf{s}^T \ddot{\mathbf{x}} + \kappa \ddot{u})$; \mathbf{r}_s 为地震作用的位置向量,各元素均为 1; \mathbf{x} 为隔震结构相对地面的位移向量,

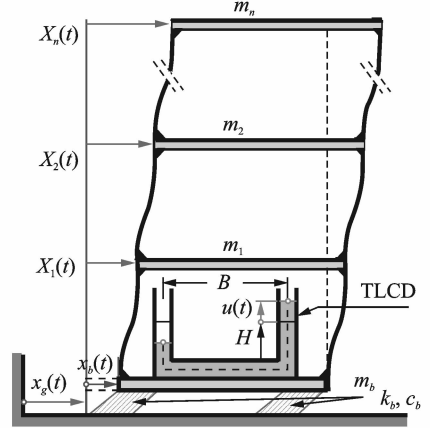


图 2 TLCD 多质点层间剪切模型

Fig. 2 Base-isolated multi-story shear frame equipped with TLCD

$\mathbf{x} = [x_b, x_1, \dots, x_{(n-1)}, x_n]^T$; $\dot{\mathbf{x}}$ 为隔震结构相对地面的速度向量, $\dot{\mathbf{x}} = [\dot{x}_b, \dot{x}_1, \dots, \dot{x}_{(n-1)}, \dot{x}_n]^T$; $\ddot{\mathbf{x}}$ 为隔震结构相对地面的加速度列向量, $\ddot{\mathbf{x}} = [\ddot{x}_b, \ddot{x}_1, \dots, \ddot{x}_{(n-1)}, \ddot{x}_n]^T$; \mathbf{K} 为刚度矩阵, $\mathbf{K} =$

$$\begin{bmatrix} k_b + k_1 & -k_1 & & & & \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & & & \\ & \vdots & \vdots & \vdots & & \\ & & 0 & -k_{(n-1)} & k_{(n-1)} + k_n & -k_n \\ & & & -k_n & k_n & \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)}$$

\mathbf{C} 为阻尼矩阵, $\mathbf{C} =$

$$\begin{bmatrix} c_b + c_1 & -c_1 & & & & \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 & & & \\ & \vdots & \vdots & \vdots & & \\ & & 0 & -c_{(n-1)} & c_{(n-1)} + c_n & -c_n \\ & & & -c_n & c_n & \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)}$$

上部结构阻尼矩阵通常采用 Rayleigh 阻尼,即用质量矩阵和刚度矩阵的线性组合来表示,隔震层阻尼 $c_b = 2m_b \zeta_b \omega_b$ 。对于任意位置安装 TLCD,只需修改式(6)中 \mathbf{s} 。

2 采用 TLCD-结构转化 TMD-结构方法设计 TLCD 参数

结构处于弹性状态时,多自由度结构体系可利用振型分解法分解为若干个单自由度体系。单个 TLCD 控制结构某一振型,该 TLCD 最优频率比与最优阻尼比采用 TMD 公式,结合 TLCD-结构转化为 TMD-结构体系得到 TLCD 的最优参数。文献[9-10]给出的 TMD 最优参数公式没有考虑结构阻尼,因此对于隔震结构不予采用。Ioi 等^[8]给出了正弦荷载作用下有阻尼主结构-TMD 优化参数的经验

公式。当以位移最小化为优化目标时, TMD 与主结构的最优频率比与 TMD 最优阻尼比分别为

$$\delta_{A,opt}^* = \frac{1}{1+\mu^*} - (0.241 + 1.7\mu^* - 2.6\mu^{*2})\zeta_s^* - (1.0 - 1.9\mu^* + \mu^{*2})\zeta_s^{*2} \quad (7)$$

$$\zeta_{A,opt}^* = \sqrt{\frac{3\mu^*}{8(1+\mu^*)}} + (0.13 + 0.12\mu^* + 0.4\mu^{*2})\zeta_s^* - (0.01 + 0.9\mu^* + 3\mu^{*2})\zeta_s^{*2} \quad (8)$$

其中: μ^* 为 TMD 与主结构质量比; ζ_s 为主结构阻尼 ($\zeta_s \ll 1$)。

以加速度最小为优化目标时

$$\delta_{A,opt}^* = \sqrt{\frac{1}{1+\mu^*}} + (0.096 + 0.88\mu^* - 1.8\mu^{*2})\zeta_s^* + (1.34 - 2.9\mu^* + 3\mu^{*2})\zeta_s^{*2} \quad (9)$$

$$\zeta_{A,opt}^* = \sqrt{\frac{3\mu^*(1+0.49\mu^*-0.2\mu^{*2})}{8(1+\mu^*)}} + (0.13 + 0.72\mu^* + 0.2\mu^{*2})\zeta_s^* + (0.19 + 1.6\mu^* - 4\mu^{*2})\zeta_s^{*2} \quad (10)$$

采用 TLCD-结构转化为 TMD-结构体系方法^[11], 得到 TLCD-结构体系与 TMD-结构体系质量比、频率比、阻尼比的关系为

$$\mu^* = \frac{\mu\kappa^2}{1+\mu(1-\kappa^2)} < \mu \quad (11)$$

$$\delta_{A,opt} = \frac{f_{A,opt}}{f_s} = \frac{\delta_{A,opt}^*}{\sqrt{1+\mu(1-\kappa^2)}} \quad (12)$$

$$\zeta_{A,opt} = \zeta_{A,opt}^* \quad (13)$$

其中: μ 为 TLCD 中液体质量与主结构的质量比, 通常取 1%~6%。

根据 TLCD 与主结构的质量比 μ , 由式(11)得到等效 TMD 与主结构的质量比 μ^* 。根据式(7)~(10)得到等效 TMD 与主结构的最优频率比 $\delta_{A,opt}^*$ 与 TMD 最优阻尼比 $\zeta_{A,opt}^*$ 。根据式(13)得到 TLCD 与主结构的最优频率比 $\delta_{A,opt}$ 。

3 状态方程设计多个 TLCD 参数

采用多个 TLCD 控制结构多个振型, 考虑邻近振型的相互影响, 笔者采用状态空间方程设计多个 TLCD 参数。合并式(1)和式(6), 得到 TLCD-基础隔震结构体系耦合方程为

$$\mathbf{M}_C \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}_C \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}_C \mathbf{X} = -\mathbf{M}_{gC} \ddot{x}_g$$

其中: \mathbf{M}_C 为 TLCD-基础隔震混合系统的总体质量

矩阵, $\mathbf{M}_C = \begin{bmatrix} \mathbf{M} + s m_f s^T & s m_f \kappa \\ s^T \kappa & 1 \end{bmatrix}$; \mathbf{C}_C 为 TLCD-基础

隔震混合系统的阻尼矩阵, $\mathbf{C}_C = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & 0 \\ 0 & 2\zeta_{\omega_A} \end{bmatrix}$; \mathbf{K}_C 为

TLCD-基础隔震混合系统的刚度矩阵, $\mathbf{K}_C = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & 0 \\ 0 & \omega_A^2 \end{bmatrix}$; $\mathbf{M}_{gC} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_r s + s m_f \\ \kappa \end{bmatrix}$; $\ddot{\mathbf{X}} = [\ddot{x} \quad \ddot{u}]^T$, 为隔震结构和 TLCD 的相对加速度。

取 $\mathbf{z} = [\mathbf{X}^T \quad \dot{\mathbf{X}}^T]^T$, 在地震激励下, 基础隔震结构安装 TLCD 混合控制系统的状态方程为

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{e}_g \ddot{x}_g \quad (14)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_C^{-1} \mathbf{K}_C & -\mathbf{M}_C^{-1} \mathbf{C}_C \end{bmatrix}; \mathbf{e}_g = -\begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}_C^{-1} \mathbf{M}_{gC} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{z} + \mathbf{D}_g \ddot{x}_g(t)$$

其中: \mathbf{C} 为输出矩阵; \mathbf{D}_g 为地震作用的直接传递矩阵。

采用 Matlab 软件调用优化工具箱中 fminsearch 命令, 将上述 TLCD 参数值作为初始值, 使结构优化目标函数快速达到最小值, 从而得到多个 TLCD 再次优化参数。结构优化目标函数不同, TLCD 再次优化后的参数也会有所不同。把结构每层地震响应最小化作为目标函数, 根据式(14)得到

$$J = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{z}_s^T(\omega) \mathbf{S} \mathbf{z}_s(\omega) d\omega = 2\pi \mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{b} \rightarrow \text{Minimum}$$

其中: $\mathbf{z}_s = [\mathbf{x}^T \quad \dot{\mathbf{x}}^T]^T$, 为隔震结构的状态参数; \mathbf{S} 为半正定的正权矩阵, 表示状态参数相对重要性, \mathbf{S} 的选择需考虑工程需求。

笔者选择位移最小化为优化目标, 通过权矩阵放大隔震结构位移 \mathbf{x} 的影响。假定地震作用为时域谐波 $\ddot{x}_g(t) = a_0 e^{i\omega t}$; 激励向量 $\mathbf{b} = \mathbf{e}_g a_0$; \mathbf{P} 由 Lyapunov 代数矩阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{S}$ 得到。

4 数值计算

某上部结构为 8 层钢筋混凝土框架结构房屋, 上部结构各层质量 $m_i = 230\ 000\ \text{kg}$ ($i=1, 2, \dots, 8$); 各层层间刚度 $k_i = 390\ 000\ \text{kN/m}$ ($i=1, 2, \dots, 8$)。第 1 振型 $\{\varphi\} = [0.093\ 9; 0.278\ 4; 0.453\ 5; 0.613\ 1; 0.751\ 8; 0.864\ 9; 0.948\ 6; 1.000]$; 上部结构第 1 振型自振频率 $\omega_1 = 7.598\ 9/\text{s}$, 阻尼比 $\xi_s = 0.05$ 。隔震层质量为 33 000 kg, 刚度为 19 000 kN/m, 隔震层阻尼比 $\xi_0 = 0.05$ 。隔震结构第 1 振型自振频率为 $\omega_1 = 2.966/\text{s}$ 。采用单个 TLCD 控制该结构第 1 振型, 采用式(7)~(8)和式(11)~(13)得出 TLCD 最优参数。TLCD 设计参数如下: κ 为 0.85; μ 为 3%; m_f 为 56 030 kg; ω_A 为 2.86/s; ζ_A 为 9.54%。TLCD 管道的液柱质量取主结构第 1 模态对应的广义质量 3%, 即 56 030 kg。输入 1940 年 N-S El Centro 波、1979 年 Imperial Valley 波、1999 年 Chichi 波及 1995 年 Kobe 波, 对隔震、混合结构进行位移、加速度响应时程分

析。由于篇幅有限,图 3, 4 为在 El Centro 波和 Imperial Valley 波作用下,隔震层相对地面位移和绝对加速度的时程曲线。图 5,6 为在 El Centro 波和 Imperial Valley 波作用下,顶层相对隔震层位移和相对加速度的时程曲线。由图 3~6 可知,TLCD 在激励的前几秒对结构响应的影响很小,如果结构最大响应发生在地震作用前几秒,TLCD 对峰值响应的减震效果不明显,如 El Centro 波,在这种情况下需要采用主动 TLCD 来克服被动控制时滞作用的缺陷。在 Imperial Valley 波作用下,TLCD 对峰值响应的减震效果明显,原隔震结构顶层相对于隔震层的最大位移为 29.2 mm,而加装 TLCD 后的隔震结构顶层相对于隔震层的最大位移为 22.9 mm。隔震结构隔震层的最大位移为 135.6 mm,而加装 TLCD 后的隔震结构隔震层的最大位移为 106.6 mm,位移减震率达到 21.38 %。

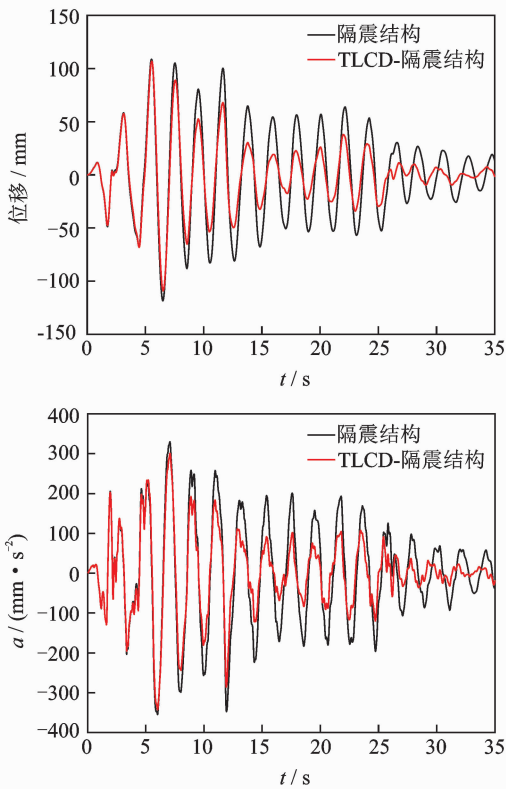


图 3 隔震层相对地面位移和绝对加速度时程曲线(N-S El Centro 波,0.2g)
Fig. 3 Relative floor displacements and absolute acceleration of isolated layer (N-S El Centro wave, 0.2g)

表 1~4 为在不同地震波作用下,工况 1(底层安置 TLCD)和工况 2(顶层安置 TLCD)时的隔震层及顶层的位移和加速度响应。可以看出,不同地震波作用下减震效果有所差异,但大多数位移和加速度减震率在 20% 以上;顶层和底层安装 TLCD 后减震效果差别不大,实际工程中可根据供水装置位置来设置 TLCD;在基础隔震结构安装 TLCD,不仅可

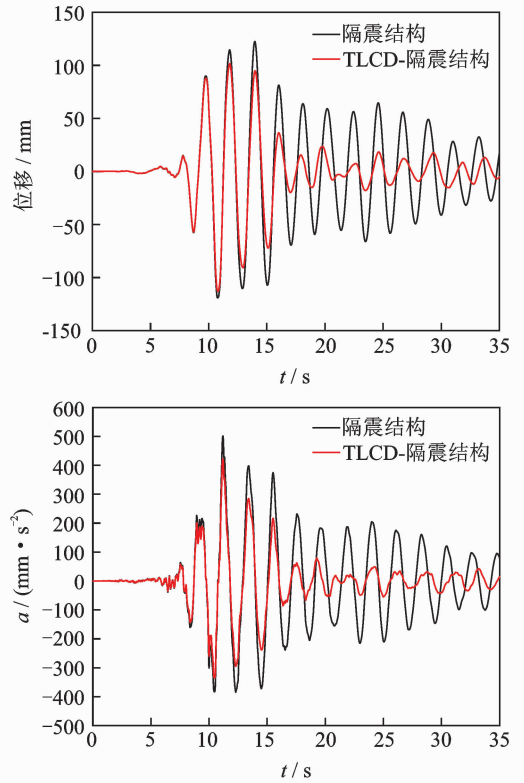


图 4 隔震层相对地面位移和绝对加速度时程曲线(Imperial Valley 波,0.2g)
Fig. 4 Relative floor displacements and absolute acceleration of isolated layer (Imperial Valley wave, 0.2g)

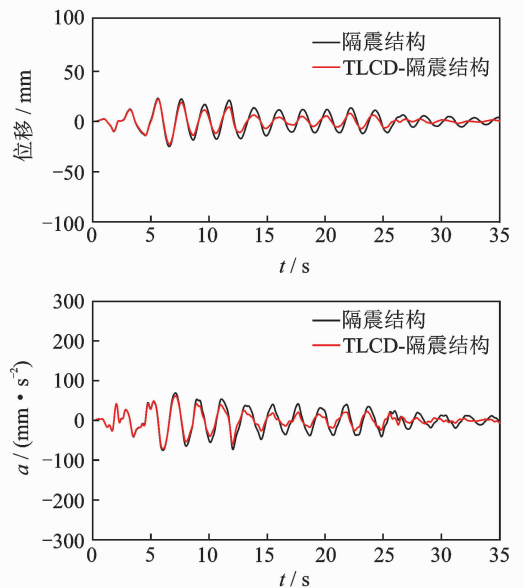


图 5 顶层相对隔震层位移和相对加速度时程曲线(N-S El Centro 波,0.2g)
Fig. 5 Relative floor displacements and relative acceleration of top floor (N-S El Centro wave, 0.2g)

以减小隔震层位移和加速度,还对各层的位移和加速度都能有效控制。

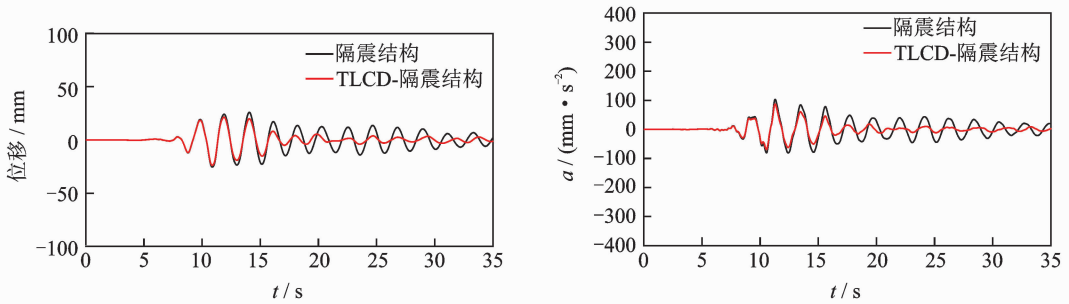


图6 顶层相对隔震层位移和相对加速度时程曲线(Imperial Valley波, 0.2g)

Fig. 6 Relative floor displacements and relative acceleration of top floor (Imperial Valley wave, 0.2g)

表1 在不同地震波作用下的隔震层位移响应

Tab. 1 The displacement response of isolated layer under different earthquakes

工况	地震波	隔震结构位移 峰值/cm	混合结构位移 峰值/cm	减震率/%	隔震结构位移 均方根值/cm	混合结构位移 均方根值/cm	减震率/%
1	El Centro	11.86	10.92	0.79	42.89	31.38	26.83
	Imperial Valley	12.25	10.16	17.06	70.34	48.27	31.37
	Chichi	5.61	3.79	32.44	28.27	21.14	24.86
	Kobe	13.27	10.55	20.49	72.87	48.56	33.36
2	El Centro	10.90	10.53	3.39	42.47	28.88	31.99
	Imperial Valley	13.56	10.66	21.38	70.13	44.56	36.46
	Chichi	5.53	3.51	36.52	28.14	20.73	26.33
	Kobe	13.08	10.25	21.63	72.84	45.31	37.79

表2 在不同地震波作用下的隔震层加速度响应

Tab. 2 The acceleration response of isolated layer under different earthquakes

工况	地震波	隔震结构加 速度峰值/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	混合结构加 速度峰值/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	减震率/%	隔震结构加 速度均方根值/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	混合结构加 速度均方根值/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	减震率/%
1	El Centro	32.98	28.51	13.43	128.08	103.86	19.53
	Imperial Valley	50.11	42.18	15.83	182.34	141.22	22.52
	Chichi	22.77	16.86	25.95	87.24	76.17	12.68
	Kobe	51.74	42.40	19.05	203.27	157.28	22.66
2	El Centro	31.39	26.11	16.82	133.79	107.76	19.54
	Imperial Valley	49.79	41.14	17.37	217.48	164.36	24.42
	Chichi	22.53	16.13	28.41	88.54	78.21	11.66
	Kobe	51.21	41.28	20.37	213.24	168.30	21.12

表3 在不同地震波作用下的顶层位移响应

Tab. 3 The displacement response of top floor under different earthquakes

工况	地震波	隔震结构位移 峰值/cm	混合结构位移 峰值/cm	减震率/%	隔震结构位移 均方根值/cm	混合结构位移 均方根值/cm	减震率/%
1	El Centro	2.30	2.21	3.91	9.94	6.65	33.09
	Imperial Valley	2.59	2.02	22.01	14.33	9.24	35.52
	Chichi	1.19	0.83	30.25	6.25	4.14	33.76
	Kobe	2.80	2.28	18.57	15.32	9.27	39.49
2	El Centro	2.34	2.30	1.71	8.88	6.02	28.60
	Imperial Valley	2.92	2.29	21.57	14.21	9.17	35.46
	Chichi	2.01	1.18	41.29	5.67	4.01	29.27
	Kobe	2.81	2.11	24.91	14.83	9.21	37.49

表 4 在不同地震波作用下的顶层加速度响应
Tab. 4 The acceleration response of top floor under different earthquakes

工况	地震波	隔震结构加 速度峰值/ (cm · s ⁻²)	混合结构加 速度峰值/ (cm · s ⁻²)	减震率/%	隔震结构加 速度均方根值/ (cm · s ⁻²)	混合结构加 速度均方根值/ (cm · s ⁻²)	减震率/%
1	El Centro	6.92	6.02	13.01	46.21	35.24	23.73
	Imperial Valley	10.28	8.65	15.85	66.24	47.67	28.03
	Chichi	4.69	3.61	20.89	24.97	20.51	17.86
	Kobe	10.77	7.89	26.74	77.14	54.27	29.64
2	El Centro	7.01	6.07	13.41	43.93	34.19	22.72
	Imperial Valley	10.36	8.45	18.43	52.31	44.64	15.38
	Chichi	4.69	3.32	29.21	24.37	20.19	17.28
	Kobe	10.87	7.49	31.09	62.97	52.14	17.46

5 结 论

1) 在不同地震波作用下,减震率有差别。如果结构峰值响应出现在前几秒,TLCD 峰值响应减震率小,需采用主动控制装置。

2) TLCD 装设在顶层与底层减震效果差别不大,可根据供水装置位置改良成 TLCD。

3) 在基础隔震结构安装 TLCD,不仅可以保持基础隔震的优点,还可有效降低基础隔震层的相对位移和绝对加速度。可见。混合控制比单一的控制手段有广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] 李慧,王亚楠,杜永峰. 平稳随机地震激励下 TMD-基础隔震混合控制体系的减震效果分析[J]. 合肥工业大学学报, 2013,36(2):187-191.
LI Hui, WANG Yanan, DU Yongfeng. Effectiveness of TMD-base isolation hybrid control system under stationary stochastic excitation[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2013,36(2):187-191. (in Chinese)

[2] 王亚楠,李慧,杜永峰. TMD-基础隔震混合控制体系在近场地震作用下的能量响应与减震效果分析[J]. 振动与冲击, 2014,33(4):204-209.
WANG Yanan, LI Hui, DU Yongfeng. Energy response and anti-vibration effect analysis for a base-isolated structure with TMD under near-field earthquake [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(4): 204-209. (in Chinese)

[3] 张文芳,孔鹏. 结构顶部 TMD 系统采用隔震部件的减震研究[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(6): 629-633, 653.
ZHANG Wenfang, KONG Peng. Study on seismic absorption of TMD system with isolation components on top of structure[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(6):629-633, 653. (in Chinese)

[4] TANIGUCHI T, KIUREGHIAN A D, MELKUMYAN M. Effect of tuned mass damper on displacement demand of base-isolated structures [J]. Engineering Structures, 2008,30(12):3478-3488.

[5] XIANG P, NISHITANI A. Optimum design for more effective tuned mass damper system and its application to base-isolated buildings[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2014,21(1):98-114.

[6] MATTEO A D, FURTMUELLER T, ADAM C, et al. Optimal design of tuned liquid column dampers for seismic response control of base-isolated structures [J]. Acta Mechanica, 2018,229(2):437-454.

[7] ADAM C, MATTEO A D, FURTMUELLER T, et al. Earthquake excited base-isolated structures protected by tuned liquid column dampers: design approach and experimental verification[J]. Procedia Engineering, 2017,199:1574-1579.

[8] IOI T, IKEDA K. On the dynamic vibration damped absorber of the vibration system [J]. Bulletin of JSME, 1977,43(369):1707-1715.

[9] DEN HARTOG J P. Mechanical vibrations[M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1956:215-220.

[10] BAKRE S V, JANGID R S. Optimum parameters of tuned mass damper for damped main system[J]. Structural Control Health Monitoring, 2007,14(3):448-470.

[11] 符川. TLCD-结构转化为 TMD-结构减振控制的研究[J]. 工程力学, 2016, 33(4):114-120,129.
FU Chuan. Vibration control of transforming TLCD-structure to TMD-structure[J]. Engineering Mechanics, 2016,33(4):114-120,129. (in Chinese)



第一作者简介:符川,女,1979年9月生,副教授。主要研究方向为建筑结构抗震、减震及隔震。曾发表《TLCD-结构转化为 TMD-结构减振控制的研究》(《工程力学》2016年第33卷第4期)等论文。

E-mail: fcjobsuch@sina.com

