

竖向地震作用下TMD-基础隔震结构的减振控制研究

李子健, 符川

北方工业大学土木工程学院, 北京

收稿日期: 2023年6月25日; 录用日期: 2023年7月16日; 发布日期: 2023年7月27日

摘要

针对减小竖向地震作用对高层建筑和大跨结构的破坏这一问题, 本文将竖向基础隔震结构与竖向调频质量阻尼器(简称TMD)组合形成混合系统, 对高层建筑与大跨结构的竖向地震响应的时程动力分析, 通过对比竖向基础隔震结构和竖向TMD-竖向基础隔震结构的动力特性, 绘出了竖向地震作用下结构隔震层相对于地面的位移、加速度及顶层相对于隔震层的位移、加速度时程曲线, 得到了竖向TMD-竖向基础隔震结构能减少竖向基础隔震结构位移和加速度响应。

关键词

竖向地震, 基础隔震, 竖向调频质量阻尼器, 高层建筑, 时程分析

Research on Vibration Reduction Control of TMD Foundation Isolation Structures under Vertical Earthquake Action

Zijian Li, Chuan Fu

School of Civil Engineering, North University of Technology, Beijing

Received: Jun. 25th, 2023; accepted: Jul. 16th, 2023; published: Jul. 27th, 2023

Abstract

In response to the issue of reducing the damage of vertical seismic action to high-rise buildings and large-span structures, this paper combines a vertical foundation isolation structure with a vertical tuned mass damper (TMD) to form a hybrid system. The time-history dynamic analysis of

the vertical seismic response of high-rise buildings and large-span structures is conducted, and the dynamic characteristics of the vertical foundation isolation structure and the vertical TMD vertical foundation isolation structure are compared. The displacement and acceleration time history curves of the structural isolation layer relative to the ground under vertical seismic action, as well as the displacement and acceleration time history curves of the top layer relative to the isolation layer, were plotted. It was found that the vertical TMD vertical foundation isolation structure can reduce the displacement and acceleration response of the vertical foundation isolation structure.

Keywords

Vertical Earthquake, Foundation Isolation, Vertical Frequency Modulation Mass Damper, High Rise Building, Time History Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地震具有水平分量和竖向分量, 比较竖向地震动峰值(PGA)与水平地震动峰值, 该比值约是 1/2~2/3, 各国地震规范规定地面加速度垂直分量的峰值约是水平分量的 2/3。然而, 近几十年的多次地震, 特别是在近断层地震中, 例如, 1976 年苏联的盖兹利地震记录, 1979 年的美国的伊姆佩尔地震记录, 都表明了竖直地震加速度已大于水平地震加速度[1] [2]。特别是对于高层建筑结构, 由于在重力载荷的作用下, 其产生的压应力会沿着高度方向逐渐降低, 这就会造成建筑结构的上部在竖向地震作用下, 因上下振动而出现拉应力, 与此同时, 它还能够极大地降低建筑结构的侧向刚度, 因此, 对建筑结构竖向地震进行研究有着重大实际工程意义[3] [4]。一般情况下, 基础隔震指的是在上部结构与基础之间, 设置一个隔震层, 这样可以延长建筑结构的自振周期, 也是为了避开卓越周期, 进而降低地震能量向上部结构的传导[5] [6] [7]。在水平地震时, 由于隔震支座的横向刚度很小, 上部结构的水平位移接近平动, 而隔震支座对竖向地震动的抑制效果不大[8] [9]。

本文针对这一问题, 拟采用基础隔震与竖向 TMD 联合使用的技术, 降低竖向地震反应。与此同时, 将一栋十二层的高层建筑作为例子, 使用 MATLAB [10]软件编写了一个计算程序, 绘制出在垂直地震作用下, 高层建筑隔震层相对于地面的位移、加速度以及顶层相对于隔震层的位移、加速度时程曲线, 以此来对这两种结构的减震性能进行对比。

2. 多层基础隔震体系

假设隔震结构平面、竖向规则, 且梁的高跨比较大, 在竖向地震作用下, 梁的跨中与支座的竖向位移相差不大, 故在竖向各层简化为一个质点, 整个结构的竖向刚度中心与质量中心一致。在水平与竖向地震共同作用时, 结构出现较大水平位移后, 基底受竖向外荷载和竖向惯性力作用时会产生弯矩的 P-Δ 效应导致结构水平刚度降低, 当不考虑 P-Δ 效应(几何非线性)时, 竖向地震动对结构水平运动无影响。水平地震动对结构竖向运动无影响, 结构竖向运动是独立的。

$m_1 \sim m_n$ 和 $k_{v1} \sim k_{vn}$ 为上部结构各楼层质量和竖向刚度, m_b 和 k_{bv} 分别为隔震层质量和竖向刚度。隔震结构运动方程为:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{M}}_S \ddot{\mathbf{Y}} + \tilde{\mathbf{C}}_S \dot{\mathbf{Y}} + \tilde{\mathbf{K}}_S \mathbf{Y} &= -\tilde{\mathbf{M}}_S \bar{\mathbf{r}}_s \ddot{y}_g \quad (1) \\ \bar{\mathbf{Y}} &= [y_b \quad y_1 \quad \cdots \quad y_{n-1} \quad y_n]^T, \\ \dot{\bar{\mathbf{Y}}} &= [\dot{y}_b \quad \dot{y}_1 \quad \cdots \quad \dot{y}_{n-1} \quad \dot{y}_n]^T, \\ \ddot{\bar{\mathbf{Y}}} &= [\ddot{y}_b \quad \ddot{y}_1 \quad \cdots \quad \ddot{y}_{n-1} \quad \ddot{y}_n]^T \\ \tilde{\mathbf{K}}_S &= \begin{bmatrix} k_{bv} + k_{1v} & -k_{1v} & & 0 \\ & \ddots & & \vdots \\ & & -k_{(n-1)v} & -k_{(n-1)v} + k_{nv} & -k_{nv} \\ & & & -k_{nv} & k_{nv} \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)}, \end{aligned}$$

式中: $\tilde{\mathbf{M}}_S = \text{diag}(m_b, m_1, \dots, m_{n-1}, m_n)_{(n+1) \times (n+1)}$ 表示竖向隔震结构的质量矩阵, $\tilde{\mathbf{C}}_S$ 、 $\tilde{\mathbf{K}}_S$ 表示竖向隔震结构的阻尼矩阵与刚度阵, $\bar{\mathbf{Y}}$ 、 $\dot{\bar{\mathbf{Y}}}$ 、 $\ddot{\bar{\mathbf{Y}}}$ 是竖向隔震结构中每一层的相对地面位移, 速度矢量, 加速度矢量, $\bar{\mathbf{r}}_s$ 是竖向地震作用的位置矢量, 并且是一个单元矢量, $\bar{\mathbf{r}}_s = [1 \quad 1 \quad \cdots \quad 1]_{n+1}^T$ 。竖向阻尼矩阵选择 Rayleigh 阻尼, 它是由竖向刚度矩阵与质量矩阵线性结合而成。

3. 多层竖向 TMD-基础隔震体系

当竖向基础隔震结构顶层装设 1 个竖向 TMD 时, 结构的计算模型如图 1 所示:

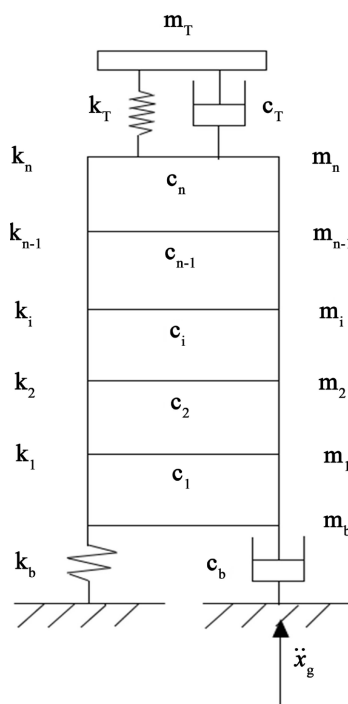


Figure 1. Calculation model

图 1. 计算模型

TMD 运动方程为:

$$m_T \ddot{y}_T + c_{Tv} \dot{y}_T + k_{Tv} y_T = -m_T (\ddot{y}_g + \bar{\mathbf{s}}^T \ddot{\mathbf{Y}}), \quad \bar{\mathbf{s}} = [0, \dots, 0, \dots, 1]^T \quad (2)$$

m_T, k_{Tv} 和 c_{Tv} 分别为竖向 TMD 子结构的质量、竖向刚度和竖向阻尼。竖向 TMD 阻尼为 $c_{Tv} = 2m_T \zeta_{Tv} \omega_{Tv}$ 。考虑 TMD 对顶层的作用力 F_T ，基础隔震结构运动方程为

$$\tilde{\mathbf{M}}_S \ddot{\mathbf{Y}} + \tilde{\mathbf{C}}_S \dot{\mathbf{Y}} + \tilde{\mathbf{K}}_S \mathbf{Y} = -\tilde{\mathbf{M}}_S \bar{\mathbf{r}}_s \ddot{y}_g + \bar{\mathbf{s}} F_T, \quad (3)$$

将(2)、(3)式进行综合，可获得 TMD-基础隔震结构系统耦合方程：

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{M}}_{\text{混}} \ddot{\mathbf{U}}_{\text{混}} + \tilde{\mathbf{C}}_{\text{混}} \dot{\mathbf{U}}_{\text{混}} + \tilde{\mathbf{K}}_{\text{混}} \mathbf{U}_{\text{混}} &= -\tilde{\mathbf{M}}_{g\text{混}} \ddot{y}_g, \\ \tilde{\mathbf{M}}_{\text{混}} &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{M}}_S + \bar{\mathbf{s}} m_T \bar{\mathbf{s}}^T & \bar{\mathbf{s}} m_T \\ \bar{\mathbf{s}}^T m_T & m_T \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{C}}_{\text{混}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}_S & 0 \\ 0 & 2m_T \zeta_{Tv} \omega_{Tv} \end{bmatrix}, \\ \tilde{\mathbf{K}}_{\text{混}} &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{K}}_S & 0 \\ 0 & m_T \omega_A^2 \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{M}}_{g\text{混}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{M}}_S \bar{\mathbf{r}}_s + \bar{\mathbf{s}} m_T \\ m_T \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4)$$

上式中 $\tilde{\mathbf{M}}_{\text{混}}$ ， $\tilde{\mathbf{C}}_{\text{混}}$ ， $\tilde{\mathbf{K}}_{\text{混}}$ 为 TMD 与地基础隔震复合体系的整体质量、阻尼、刚度的矩阵。

$\ddot{\mathbf{U}}_{\text{混}} = [\ddot{\mathbf{Y}} \quad \ddot{y}_g]^T$ 为隔震结构和 TMD 的相对加速度。取 $\bar{\mathbf{z}} = [\bar{\mathbf{U}}_{\text{混}}^T \quad \dot{\mathbf{U}}_{\text{混}}^T]^T$ ，在地震激励下，基础隔震结构安装 TMD 混合控制系统的状态方程表示为

$$\dot{\bar{\mathbf{z}}} = \tilde{\mathbf{A}} \bar{\mathbf{z}} + \tilde{\mathbf{e}}_g \ddot{y}_g, \quad (5)$$

$$\bar{\mathbf{J}} = \tilde{\mathbf{C}} \bar{\mathbf{z}} + \tilde{\mathbf{D}}_g \ddot{y}_g(t), \quad (6)$$

其中各个矩阵表示为

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{A}} &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{0}} & \tilde{\mathbf{I}} \\ -\tilde{\mathbf{M}}_{\text{混}}^{-1} \tilde{\mathbf{K}}_{\text{混}} & -\tilde{\mathbf{M}}_{\text{混}}^{-1} \tilde{\mathbf{C}}_{\text{混}} \end{bmatrix}, \\ \tilde{\mathbf{e}}_g &= -\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{0}} \\ \tilde{\mathbf{M}}_{\text{混}}^{-1} \tilde{\mathbf{M}}_{g\text{混}} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

上述矩阵中 $\tilde{\mathbf{C}}$ 为输出矩阵， $\tilde{\mathbf{D}}_g$ 表示地震作用的直接传递矩阵。

4. 竖向地震作用下 TMD 系统参数优化

TMD 设置于基础隔震结构顶层来控制结构第一振型，在正弦加载下，Ioi、Ikeda [11]等人提出了带阻尼器的 TMD 最优参数计算方法。在将加速度设定最小为最优情况下时：

$$\delta_{A,opt} = \sqrt{\frac{1}{1+\mu}} + (0.096 + 0.88\mu - 1.8\mu^2) \zeta_S + (1.34 - 2.9\mu + 3\mu^2) \zeta_S^2, \quad (8)$$

$$\zeta_{A,opt} = \sqrt{\frac{3\mu(1+0.49\mu-0.2\mu^2)}{8(1+\mu)}} + (0.13 + 0.72\mu + 0.2\mu^2) \zeta_S + (0.19 + 1.6\mu - 4\mu^2) \zeta_S^2. \quad (9)$$

工程上 TMD-隔震结构系统质量比 μ 通常取 1%~5%。 ζ_S 为上部结构阻尼比，取 0.05。

5. 数值计算

一栋十二层高层建筑为例，隔震层与上部结构各层质量为 $m_{\text{隔}} = 2 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $m_1 = 2.45 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $m_2 = 2.45 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $m_3 = 2.4 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $m_4 = 2.36 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $m_5 = 2.36 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $m_6 = 2.36 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $m_7 = 2.36 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $m_8 = 2.36 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $m_9 = 2.36 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $m_{10} = 2.32 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $m_{11} = 2.28 \times 10^4 \text{ kg}$ ， $m_{12} = 1.23 \times 10^4 \text{ kg}$ ，隔震层竖向刚度为 $k_{\text{竖向隔}} = 5 \times 10^7 \text{ N/m}$ 。上部结构的阻尼比 $\zeta_s = 0.05$ ，隔震层阻尼比 $\zeta_{\text{隔}} = 0.1$ 。上部结构

第一振型自振频率 $\omega_1 = 60.502 \text{ rad/s}$, 竖向隔震结构第一振型自振频率为 $\omega_{\text{竖向隔}} = 15.463 \text{ rad/s}$ 。采用单个 TMD 控制该结构第 1 振型, 由式(8)和式(9)得出 TMD 最优参数。TMD 设计参数如下: μ 为 2%; m_T 为 3430 kg; ζ_A 为 9.57%。设置竖向隔震支座时 TMD 的频率 ω_A 为 14.999 rad/s。本分析选用峰值为 200 gal 的 1940 年 El Centro 波、1995 年 Kobe 波、1999 年 Chichi 波、1976 年 Tianjin 波加速度记录作为输入, 通过 MATLAB 编程得到隔震层相对与地面、混合结构相对于隔震结构的位移和加速度时程反应图。

如图 2、图 3 为 200 gal El Centro 和 Kobe 竖向地震波作用下水平隔震结构和竖向 TMD-水平隔震结构的顶层相对于地面位移、加速度时程曲线。由图可知, 竖向 TMD-水平隔震结构并没有降低高层建筑在竖向地震作用下的反应。对于该高层建筑结构, 其周期在 0.1 s 左右, 竖向地震波的卓越周期在 0.1~1 s, 该高层建筑的自振周期与竖向地震波场地相近, 在设置水平隔震支座时, 由于水平隔震支座的竖向刚度与上部结构各层竖向刚度相当, 没有延长结构的周期, 因此在水平基础隔震结构的基础上加设竖向 TMD 不能降低该高层建筑的竖向地震响应。

竖向隔震结构和竖向 TMD-竖向隔震结构的隔震层相对地面、顶层相对于隔震层位移及隔震层绝对加速度、顶层相对隔震层加速度时程曲线如图 4~7 所示。由于设置竖向隔震支座, 延长了结构的自振周期, 因此安装竖向 TMD 后, 降低了隔震层和顶层的位移、加速度响应。

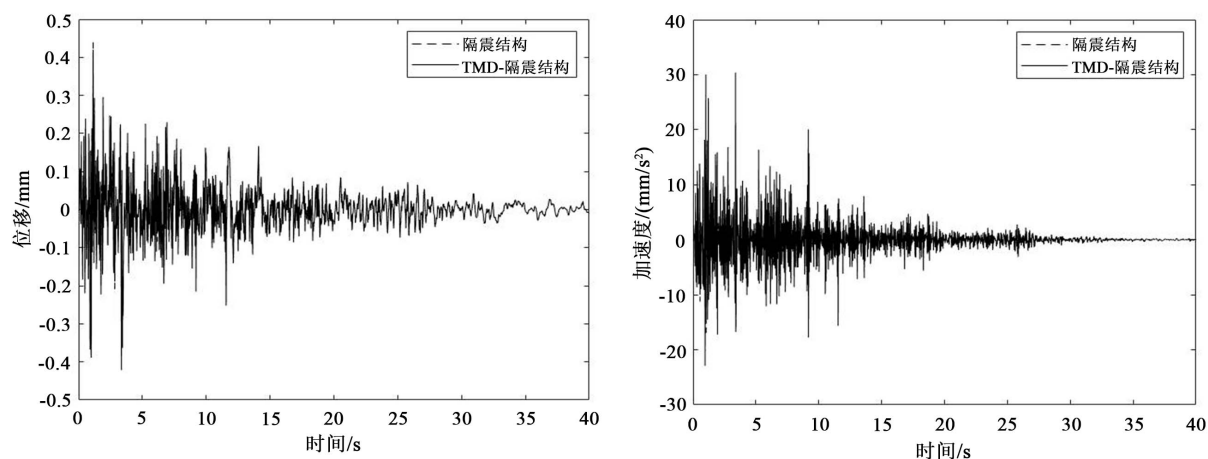


Figure 2. Relative floor displacements and relative acceleration of top floor (El Centro wave, 0.2 g)

图 2. 顶层相对地面位移与加速度的时程曲线(El Centro 波, 0.2 g)

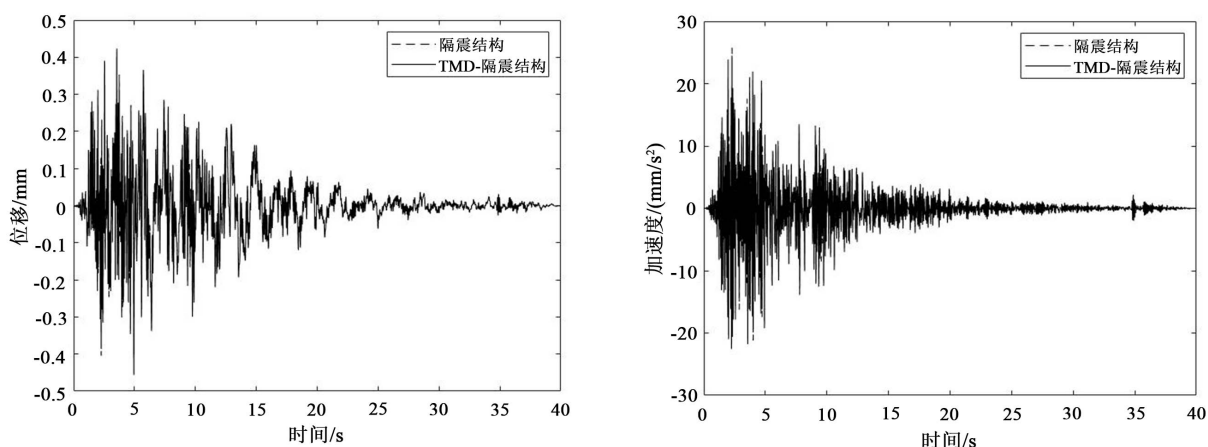


Figure 3. Relative floor displacements and relative acceleration of top floor (Kobe wave, 0.2 g)

图 3. 顶层相对地面位移和加速度时程曲线(Kobe 波, 0.2 g)

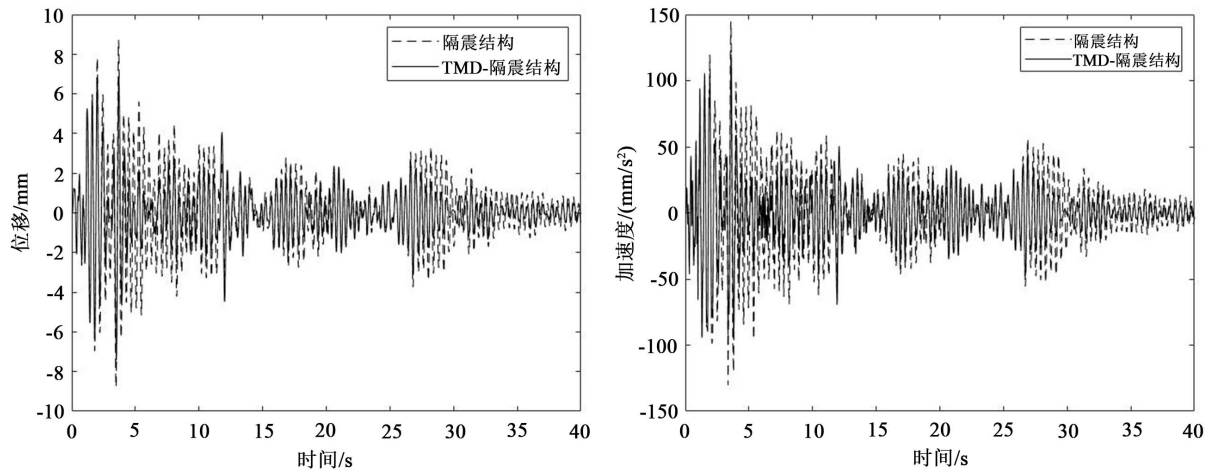


Figure 4. Relative floor displacements and absolute acceleration of isolated layer (El Centro wave, 0.2 g)

图 4. 隔震层相对地面位移和绝对加速度时程曲线(El Centro 波, 0.2 g)

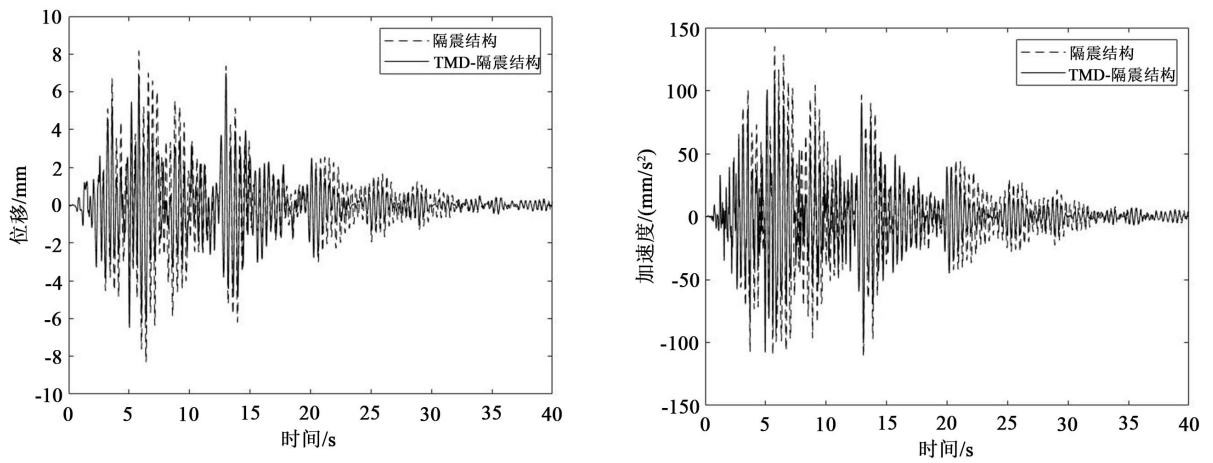


Figure 5. Relative floor displacements and absolute acceleration of isolated layer (Kobe wave, 0.2 g)

图 5. 隔震层相对地面位移和绝对加速度时程曲线(Kobe 波, 0.2 g)

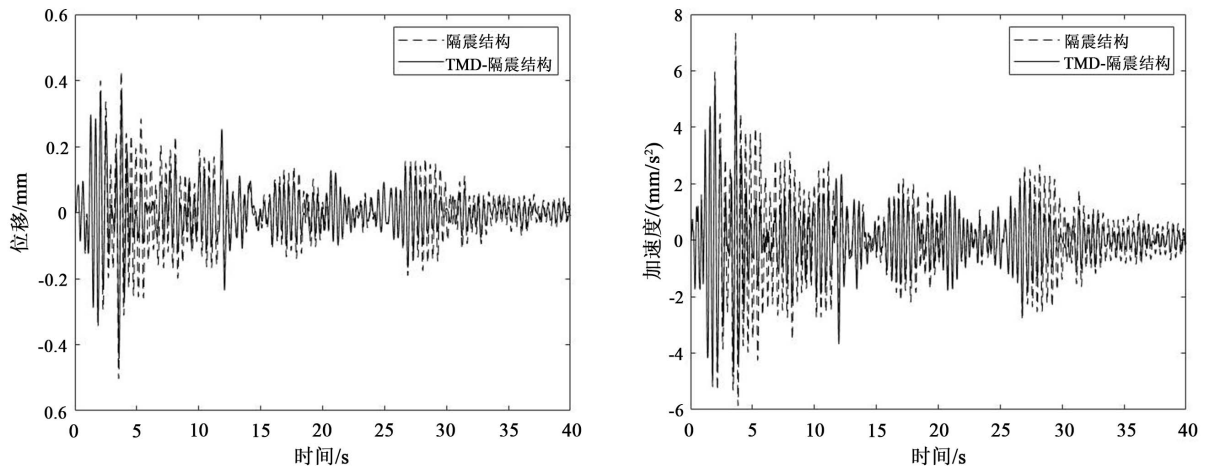


Figure 6. Relative isolated layer displacements and relative acceleration of top floor (El Centro wave, 0.2 g)

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

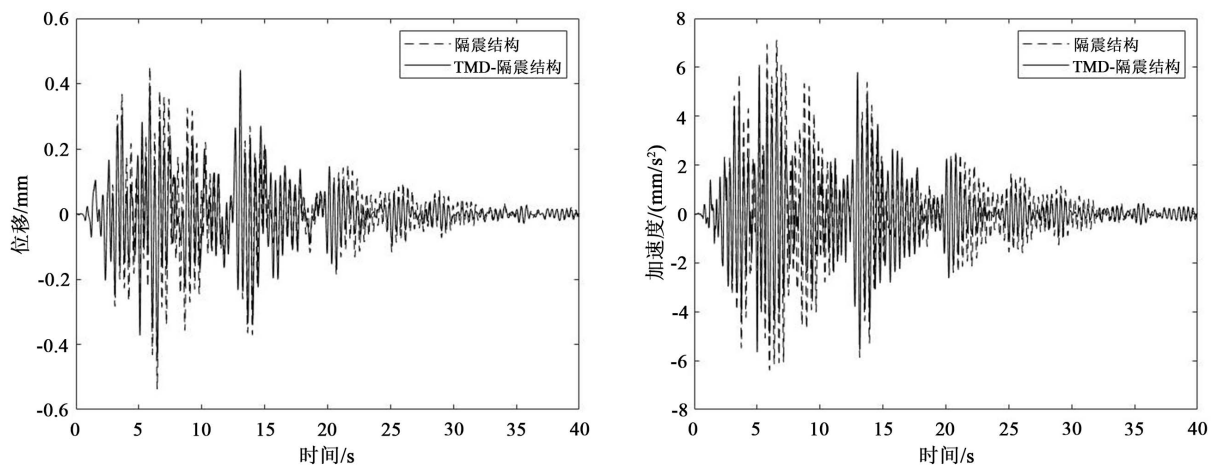


Figure 7. Relative isolated layer displacements and relative acceleration of top floor (El Centro wave, 0.2 g)

图 7. 顶层相对隔震层位移和相对加速度时程曲线(Kobe 波, 0.2 g)

在四条地震波的作用下, 竖直隔震结构与竖直 TMD-竖直隔震结构的隔震层相对地面及顶层的相对隔震层位移峰值, 隔震层的绝对加速度及顶层的相对加速度峰值、减振率, 见表 1~4。从表 1~4 可以看出, 安装竖直 TMD 后, 结构的位移峰值降低, 其减振率大于 15%。加速度峰值降低, 其减振率大于 20%。且均方根值也降低。对竖向基础隔震结构安装竖向 TMD, 不仅可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。

在 Chichi 波作用下, 竖向 TMD 对峰值响应的减震效果明显, 竖向基础隔震结构顶层相对于隔震层的最大位移和加速度分别为 5.5 mm、104.0 mm/s²。而加装竖向 TMD 后的隔震结构顶层相对于隔震层的最大位移和加速度分别为 4.4 mm、84.6 mm/s²。竖向基础隔震结构隔震层的最大位移和加速度分别为 5.3 mm、100.6 mm/s², 而加装竖向 TMD 后的隔震结构隔震层的最大位移和加速度分别为 4.2 mm、82.2 mm/s², 位移减震率和加速度减震率分别达到 20.86%、18.31%。

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

表 1. 在不同地震波作用下的隔震层位移响应

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/%
El Centro	0.88	0.74	15.47	0.19	0.14	28.95
Kobe	0.79	0.67	15.40	0.18	0.14	23.76
Chichi	0.53	0.42	20.86	0.10	0.07	29.59
Tianjin	1.02	0.86	15.38	0.21	0.17	20.19

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

表 2. 在不同地震波作用下的隔震层加速度响应

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/%
El Centro	14.48	11.99	17.17	3.01	2.13	29.26
Kobe	13.52	10.85	19.76	3.07	2.31	24.67

Continued

Chichi	10.06	8.22	18.31	1.73	1.25	27.85
Tianjin	16.92	14.06	16.93	3.49	2.76	21.06

Table 3. The displacement response of top floor under different earthquakes**表 3.** 在不同地震波作用下的顶层位移响应

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/%
El Centro	0.92	0.77	15.52	0.20	0.14	29.08
Kobe	0.83	0.70	15.99	0.19	0.14	23.53
Chichi	0.55	0.44	20.69	0.10	0.07	29.00
Tianjin	1.05	0.89	15.18	0.22	0.17	20.37

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

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/%
El Centro	14.91	12.34	17.23	3.09	2.18	29.39
Kobe	13.91	11.13	19.96	3.16	2.38	24.71
Chichi	10.40	8.46	18.60	1.78	1.28	28.08
Tianjin	17.42	14.48	16.90	3.60	2.85	20.88

6. 结论

诸多地震记录表明, 竖向地震对建筑物尤其是高层建筑的破坏远大于水平地震, 因此竖向地震作用不容忽视。本文建立多层隔震结构和竖向 TMD-隔震结构动力方程, 利用 MATLAB 软件能够得到在竖向地震作用下隔震结构和竖向 TMD-隔震结构的时程图以及位移和加速度峰值、均方根值及减震率。

高层建筑在设置水平隔震支座时, 对比基础隔震结构及竖向 TMD-隔震结构的时程图, 发现并没有降低高层建筑在竖向地震作用下的反应, 因此不宜采用竖向 TMD 降低水平基础隔震结构的竖向地震响应。

高层建筑通过装设竖向隔震支座, 延长了结构的竖向周期, 且在装设竖向 TMD 后, 降低了结构的位移以及加速度响应, 因此混合控制系统能有效降低高层建筑在竖向地震作用下的响应。

参考文献

- [1] 李宏男, 霍林生. 结构多维减震控制[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 周伟. 竖向地震作用对框架结构动力响应影响分析[J]. 建筑结构, 2018, 48(S): 306-310.
- [3] 宋晓, 谭平, 周福霖, 等. 基础隔震结构高宽比限值研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(6): 43-51.
- [4] 党育, 霍凯成. 多层隔震结构的竖向地震作用研究[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(4): 139-145.
- [5] 唐时军, 唐驾时, 欧耀辉. 竖向地震作用下的结构 TMD 控制分析[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2006, 19(3): 60-63.
- [6] 唐克东, 郭祥程, 范程程. 基础隔震多层钢框架结构地震反应分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(3): 91-98.

- [7] 符川, 肖怡凡. TLCD-基础隔震框架结构的减振控制研究[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(4): 788-793.
- [8] 胡晓莹, 朱玉华. 基础隔震结构竖向地震反应试验研究[J]. 结构工程师, 2012, 28(4): 122-127.
- [9] 赵亚敏. 控制结构竖向地震反应的研究[D]: [硕士学位论文]. 唐山: 河北理工大学, 2003.
- [10] (2002) MATLAB, User Guide, Control Toolbox. MathWorks Inc., Version 6.5.1.
- [11] Ioi, T. and Ikeda, K. (1977) On the Dynamic Vibration Damped Absorber of the Vibration System. *Bulletin of JSME*, **43**, 1707-1715. <https://doi.org/10.1299/kikai1938.43.1707>