

图 6 Kocaeli Turkey 地震动作用下结构第 27 与 37 质点相对位移响应时程图
Fig.6 The relative displacement histories of structures at 27th and 37th mass under Kocaeli Turkey wave excitation

表 3 主塔顶绝对位移响应
Table 3 The absolute displacement drift of the tower top

序号 (短周期地震动)	位移峰值/m		TMD 控制效果	位移均方根值/m		TMD 控制效果
	无控	TMD		无控	TMD	
1	0.98	0.58	41.05%	0.30	0.19	37.09%
2	1.51	1.14	24.73%	0.62	0.31	49.26%
3	1.92	1.01	47.43%	0.52	0.27	48.52%
4	3.13	1.90	39.07%	0.71	0.32	54.63%
5	1.50	0.91	39.04%	0.44	0.25	44.85%
6	2.76	1.62	41.30%	1.04	0.49	52.93%
7	1.64	1.06	35.53%	0.52	0.33	36.14%
平均值	1.92	1.17	38.31%	0.59	0.31	46.20%

序号 (长周期地震动)	位移峰值/m		TMD 控制效果	位移均方根值/m		TMD 控制效果
	无控	TMD		无控	TMD	
8	0.70	0.93	-34.06%	0.18	0.17	6.23%
9	2.68	1.70	36.71%	0.60	0.33	45.81%
10	1.57	1.26	19.39%	0.32	0.23	29.47%
11	1.87	1.18	37.14%	0.58	0.39	32.12%
12	2.84	1.90	33.05%	0.61	0.46	25.08%
13	2.57	1.09	57.68%	0.60	0.34	42.92%
14	1.51	0.75	50.36%	0.39	0.21	46.29%
平均值	1.96	1.26	28.61%	0.47	0.30	32.56%

表 4 桅杆顶绝对位移响应
Table 4 The absolute displacement drift of the mast top

序号 (短周期地震动)	位移峰值/m		TMD 控制效果	位移均方根值/m		TMD 控制效果
	无控	TMD		无控	TMD	
1	10.96	7.14	34.85%	2.99	1.91	36.11%
2	7.14	5.78	19.10%	1.88	1.18	37.08%
3	11.35	7.14	37.02%	2.44	1.36	44.22%
4	12.05	7.39	38.70%	2.47	1.45	41.42%
5	6.96	4.94	29.05%	2.00	1.30	35.16%
6	11.13	7.85	29.45%	3.95	2.19	44.54%
7	8.78	6.53	25.59%	2.68	1.79	32.94%
平均值	9.77	6.68	30.54%	2.63	1.60	38.78%

序号 (长周期地震动)	位移峰值/m		TMD 控制效果	位移均方根值/m		TMD 控制效果
	无控	TMD		无控	TMD	
8	13.89	5.91	57.43%	3.32	1.56	53.05%
9	34.15	18.66	45.35%	6.41	4.02	37.30%
10	24.19	20.60	14.84%	5.45	3.39	37.74%
11	23.45	10.07	57.09%	5.07	2.82	44.33%
12	25.53	15.90	37.70%	6.72	3.75	44.13%
13	20.78	11.33	45.49%	4.38	2.33	46.75%
14	12.24	7.23	40.94%	3.96	2.13	46.07%
平均值	22.03	12.82	42.69%	5.04	2.86	44.20%

3.2 结构响应的小波功率谱分析

在地震荷载作用过程中，结构的响应动能在各阶模态上的分布情况是时刻改变的，因此，本文应用离散数值小波变换^[9]构造位移时程响应功率谱，分析结构体系分别在长短周期地震动作用下的时频响应规律。

图 7 与图 8 例举了 Hector Mine(Los Angeles) Kocaeli Turkey (Canakkale)地震动作用下结构响应的小波功率谱，采用灰度表达小波功率谱幅值分布。对比图 7(a、c)与图 8(a、c)，在短周期 Hector Mine 地震动作用下，主塔顶的响应能量主要分布在结构的一阶模态附近，高阶模态的动能快速地消散；在长周期 Kocaeli_ Turkey 地震动作用下，主塔顶能量在频域上的分布更广，更多的分布在弱轴向二阶频率附近，这是由于 Kocaeli_ Turkey 地震动的卓越周期更靠近该二阶频率。

从图 7(b、d)与图 8(b、d)可知，桅杆的响应在二阶模态上更为剧烈，这是由于桅杆的子结构固有频率更接近结构的二阶频率，所以该频率是鞭梢效应的主要贡献模态，所以，桅杆顶的地震响应能量更多的分步在二阶模态附近。所以，应注

意到长周期地震动对桅杆鞭梢效应的不利影响。由于主塔 TMD 是针对一阶模态调谐，所以在长周期地震动作用时，由于二阶模态的活跃，主塔 TMD 的调谐效果受到一定影响。类似的，对其余地震动响应的分析结果也有不同程度的相似规律，这里不做赘述。

4 结论

- (1)运用基于矩阵广义逆的动力缩聚移频迭代方法获得的广州塔缩聚模型，可以较好地还原原结构的基本特性，同时降低了大规模分析的工作量。
- (2)长周期地震动显著增加了超高耸结构的响应，最优参数设计的 TMD 对短周期、长周期地震响应均起减震控制作用，控制性能对地震动卓越周期具有一定鲁棒性
- (3)由于一般长周期地震动的卓越周期更接近广州塔结构弱轴向的二阶周期，显著加剧了以二阶振型响应，建议对周期大于 6 s 的超高耸结构 TMD 体系，在按规范反应谱选取地震动之外，应注意考虑长周期地震动的影响，以更全面评估结构性能。

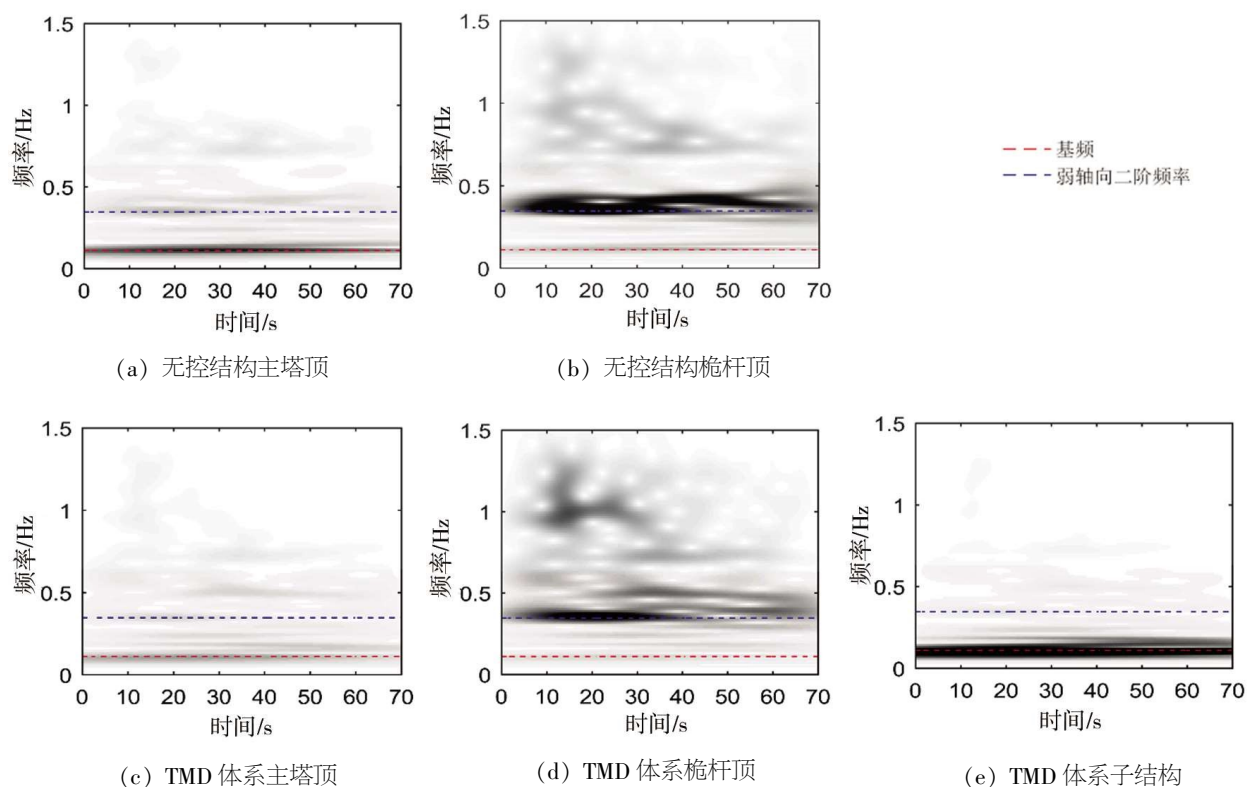


图7 Hector Mine 地震动记录作用下的位移响应小波功率谱

Fig.7 Numerical wavelet transform spectrum for displacement response under the Hector Mine wave excitation.

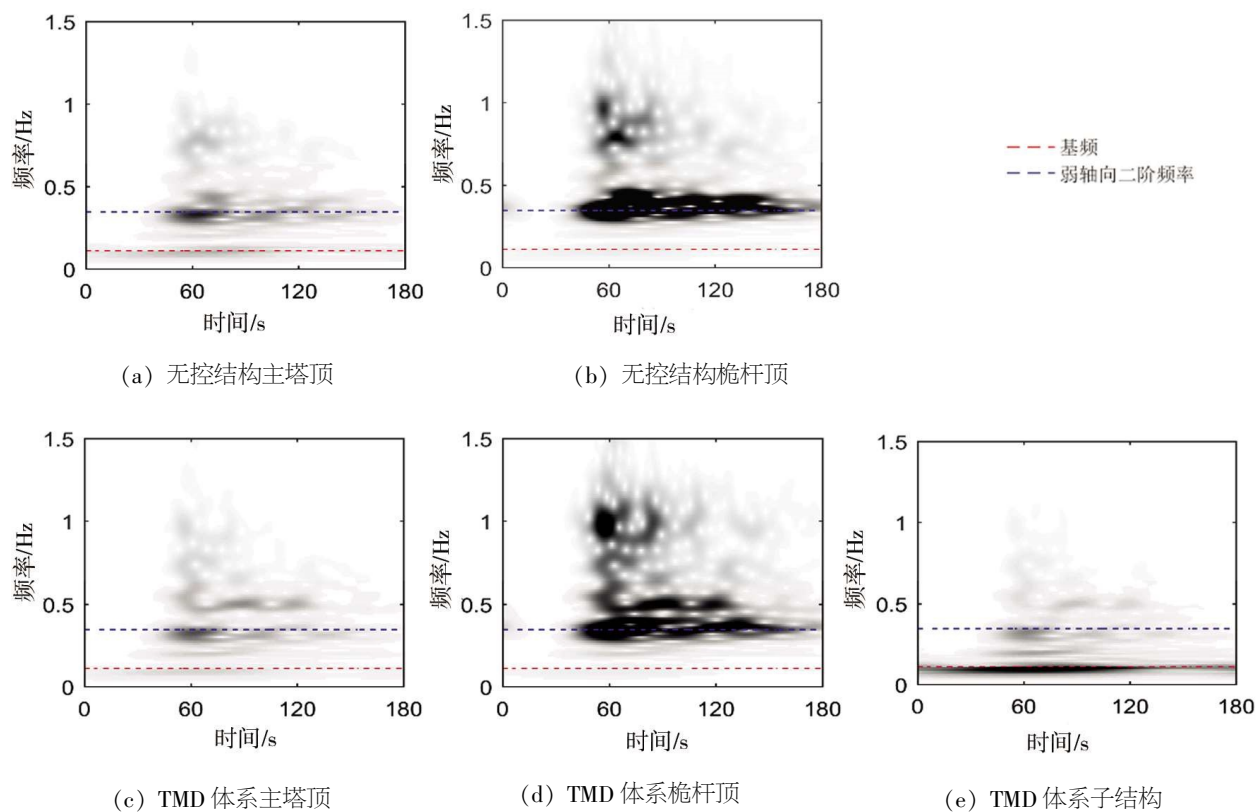


图8 Kocaeli Turke 地震动记录作用下的位移响应小波功率谱

Fig.8 Numerical wavelet transform spectrum for displacement response under the Kocaeli Turke wave excitation.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Lee C L,Chen Y T,Chung L L,et al. Optimal design theories and applications of tuned mass dampers [J]. Engineering Structures,2006,28(1):43-53.
- [3] Ni,Y.Q.,Xia,Y.,Lin,W.,et al. Shm benchmark for high - rise structures:a reduced -order finite element model and field measurement data [J]. Smart Struct. Syst,2012,10(4-5):411-426.
- [4] Guyan R J. Reduction of stiffness and mass matrices[J]. Aiaa Journal,1965,3(2):380-380.
- [5] Qu Z Q,Shi Y,Hua H. A reduced -order modeling technique for tall buildings with active tuned mass damper [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2010,30(3):349-362.
- [6] Rana R,Soong T T. Parametric study and simplified design of tuned mass dampers [J]. Engineering Structures,1998,20(3):193-204.
- [7] Chen W H,Lu Z R,Lin W,et al. Theoretical and experimental modal analysis of the Guangzhou New TV Tower [J]. Engineering Structures,2011,33 (12):3628 - 3646.
- [8] Li Q S,Fang J Q,Jeary A P,et al. Evaluation of wind effects on a supertall building based on full - scale measurements [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2015,29(12):1845-1862.
- [9] 成礼智. 小波与离散变换理论及工程实践[M]. 清华大学出版社,2005.

张冠平, 刘彦辉, 金建敏. TMD基础隔震混合减震体系地震响应研究[J]. 华南地震, 2018, 38(4): 105–110. [ZHANG Guanping, LIU Yanhui, JIN Jianmin. Study on Seismic Response of TMD Base Isolation Mixed Damping System[J]. South China journal of seismology, 2018, 38(4): 105–110]

TMD 基础隔震混合减震体系地震响应研究

张冠平¹, 刘彦辉^{2,3}, 金建敏^{2,3}

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 广东省地震工程与应用技术重点实验室, 广州 510405;
3. 工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广州 510405)

摘要: 针对基础隔震体系遭受强地震时隔震层位移较大问题, 提出了将调谐质量阻尼器(TMD)与基础隔震技术联合应用, 形成一种新型的混合减震体系, 以此控制隔震层的位移, 同时减小上部结构响应。以一栋七层基础隔震体系为仿真算例, 分别分析地震激励下基础隔震结构、调谐质量阻尼器(TMD)设置于基础隔震结构底层和顶层的混合减震体系地震响应。仿真结果表明: 附加调谐质量阻尼器(TMD)不但能够有效减小隔震层的地震响应, 同时对上部结构的响应也有不同程度的减小; 对于附加调谐质量阻尼器位于底层而言, 质量调谐阻尼器(TMD)位于顶层能够更有效的减小基础隔震体系的地震响应。

关键词: 基础隔震; 调谐质量阻尼器(TMD); 混合减震体系

中图分类号: TU352.12 文献标志码: A 文章编号: 1001-8662(2018)04-0105-06

DOI: 10.13512/j.hndz.2018.04.017

Study on Seismic Response of TMD Base Isolation Mixed Damping System

ZHANG Guanping¹, LIU Yanhui^{2,3}, JIN Jianmin^{2,3}

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technology, Guangzhou 510405, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Resistance, Earthquake Mitigation and Structural Safety, Ministry of Education, Guangzhou 510405, China;)

Abstract: To solve the problem of large displacement of the isolation layer when the base isolation system is subjected to strong earthquakes, a new type of mixed damping system is formed by combining the tuned mass damper (TMD) with the base isolation technology to control the displacement of the isolation layer and reduce the response of the upper structure. Taking a seven-story base isolation system as an example, the seismic response of a mixed system of base isolation structure and tuned mass damper (TMD) set at the bottom and top

收稿日期: 2018-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(51778163), 广东省高校创新团队项目(2016KCXTD016), 广州市科技计划项目(2017071033), 广州市属高校科研项目(120161013)。

作者简介: 张冠平(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事结构工程隔震、减震以及抗震的试验研究。

E-mail: zhangguanping@e.gzhu.edu.cn.

of the base isolation structure under seismic excitation is analyzed respectively. The simulation results show that the additional tuned mass damper (TMD) can not only effectively reduce the seismic response of the isolation layer, but also decrease the response of the superstructure to different degrees. For the additional tuned mass damper located at the bottom, the mass tuned mass damper (TMD) located at the top can effectively reduce the seismic response of the base isolation system.

Keywords: Base isolation; Tuned mass damper (TMD); Hybrid control system

0 引言

随着中国经济的快速发展,城市化进程的不断推进,人们对于建筑物的安全性和舒适性要求也越来越高^[1]。基础隔震作为一项已经成熟的减震技术,已经被充分研究并应用到大量的结构实体之中^[2]。但是,当建筑物遇到较大地震时,基础隔震结构的隔震层位移较大,有可能导致结构的破坏^[3]。为此,有必要采取一些新的减震策略来更有效的阻止结构的变形^[4]。在这些技术中以基础隔震和 TMD 的联合应用最为常见,其中基础隔震是通过在结构底部安装侧向刚度很小的隔震垫来延长结构的自震周期,使结构在地震作用下主要表现为二阶振型的平动,但同时隔震垫会产生很大的变形^[10,12]; TMD 则通过调谐结构的频率来减小结构某一特定振型振动的目的,但对结构其它振型振动控制很微弱,由此可见基础隔震和 TMD 减震技术各有其优缺点^[11]。Palazzo 和 Petti 等人已经对该混合减震体系进行了研究并确定了该混合减震体系减震的有效性。

本文以上海市某 7 层基础隔震实体结构为例,采用层剪切模型对结构体系进行简化。考虑到隔震层和上部结构的阻尼比明显不同,所以引用分区瑞雷阻尼模型求解隔震体系的阻尼矩阵。本文应用状态空间法通过 MATLAB 编程求解结构的地震响应。通过比较层间位移响应、加速度响应和层间剪力,说明基础隔震结构和 TMD 分别置于底层和顶层的混合减震体系对于地震激励下结构响应的控制效果。

1 运动方程的建立及其求解

以图 1 所示的 TMD-基础隔震混合减震体系为研究对象,用集中质量法将该体系简化为一串联多自由度体系,建立其在水平地震振动作用下的运动方程:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = M\ddot{u}_g \quad (1)$$

式中: X 为结构各层相对于地面的位移列向量; \ddot{u}_g 为输入地震振动; I 为输入地震振动的位置向量; M , K , C 分别为结构的质量、阻尼和刚度矩阵,分别表示如下^[8]:

$$M = \begin{bmatrix} m_b & & & & \\ & m_1 & & & \\ & & m_2 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & m_n \\ & & & & & m_t \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_b + k_1 & -k_1 & & & \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -k_n & -k_n + k_t & -k_t \\ & & & -k_t & k_t \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_b + c_1 & -c_1 & & & \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & -c_n & c_n + c_t & -c_t \\ & & & -c_t & c_t \end{bmatrix}$$

式中: m_b 为隔震层质量, $m_1 \sim m_n$ 为上部结构各楼层质量, m_t 为 TMD 质量; c_t 为隔震层阻尼系数, $c_1 \sim c_n$ 为上部结构各楼层阻尼系数, c_t 为 TMD 的阻尼系数, k_b 为隔震层刚度, 为上部结构各楼层刚度, k_t 为 TMD 的刚度。

为了使 TMD 充分发挥其减震作用,必须选取合适的参数(TMD 的质量、刚度和阻尼),本文采用下式来确定所需参数^[12]:

$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu} \quad (2)$$

$$\zeta_{opt}=\frac{\sqrt{\mu}\left(1-\mu/4\right)}{4\left(1+\mu\right)\left(1-\mu/2\right)}\tag{3}$$

$$m_t=m\cdot\mu\tag{4}$$

$$k_t=\left(f_{opt}\cdot w_0\right)^2\cdot m_a\tag{5}$$

$$c_t=2\cdot m_a\cdot \xi_{opt}\cdot f_{opt}\cdot w_0\tag{6}$$

式中： f_{opt} 为子结构与主结构的最优频率比； ξ_{opt} 为子结构的最优阻尼比； μ 为子结构与主结构的质量比，通常情况下取值范围为 1%~5%。

当质量比确定后，由式(2)和式(3)可以求得子结构的最优频率比和最优阻尼比，再根据式(4)、式(5)和式(6)就可以求得 TMD 的质量、刚度和阻尼^[9]。其中： w_0 为主结构的自振频率，其余参数同前。

2 混合减震体系算例

上海某小区七层隔振结构，场地类别第二类，地震分组第一组，第一层层高 4 m，第二层到第六层层高 3 m，其各层重量和刚度如表 1 所示。隔震

层的重量和刚度如表 2 所示。取 $\mu=2\%$ ，联立式(2)、式(3)、式(4)、式(5)、式(6)即可求得 TMD 的相关参数： $m_b=7.47\times10^5\text{ kg}$ ； $k_b=7.19\times10^6\text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ ； $c_b=3.95\times10^5\text{ N}\cdot\text{S/m}$ ；

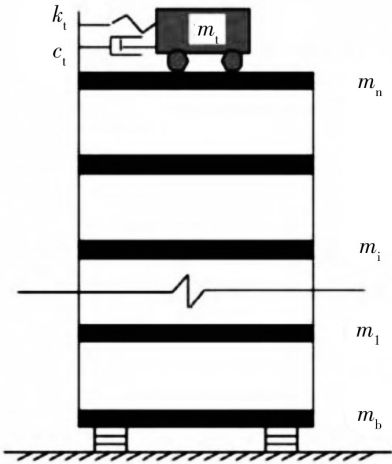


图 1 混合减震体系模型
Fig.1 TMD-base isolation Hybrid control system

表 1 结构各层的重量和刚度
Table1 The weight and stiffness of each layer of the structure

层号	1	2	3	4	5	6	7
重量/kN	54 988.77	52 659.18	53 131.63	50 521.42	48 345.91	31 110.20	7 079.59
侧移刚度(kN·m ⁻¹)	9 796 200	5 141 100	4 325 220	3 386 600	2 857 600	2 175 000	1 798 440

表 2 隔震层的重量和刚度
Table 2 The weight and stiffness of the isolation layer

隔震层重量/(G1/kN)	隔震层水平刚度/(kN·m ⁻¹)	隔震层等效阻尼比/ξeq
75 480.1	419 200	0.15

3 混合减震体系减震效果分析

为证明本文结论具有一般性，选择多条波作为地震输入，分别是 Elcentro、兰州波、Kobe 波、TH121TG045，TMD 基础隔震混合减震体系在不同地震波的激励下呈现出一致的响应规律，以下选取的 TH121TG045 波进行加载。层间位移、加速度峰值和层间剪力是抗震设计中最重要指标。所以，作者根据上述体系建立的运动方程，用 MATLAB 编程并求解，分别比较基础隔震、TMD(底层)-基础隔震、TMD(顶层)-基础隔震的地震响应。各层的层间位移、加速度峰值和层间剪力

分别如图 2、图 3、图 4 所示。图 5 为 TMD 位于结构不同位置时的位移时程曲线。

图 2 为各楼层层间位移比较图，图 3 为各楼层加速度峰值比较图，图 4 为层间剪力比较图。其中黑色星号线为基础隔震体系，正方形蓝色线为 TMD 位于底层时的混合减震体系，五角星红色线为 TMD 位于顶层时的混减震体系。各层的层间位移、加速度峰值和层间剪力的数值分别示与表 3、表 4、表 5 之中。图 5 为 TMD 时程位移曲线比较图，由图可以看出 TMD 位于底层时能够更有效的减小 TMD 的位移。

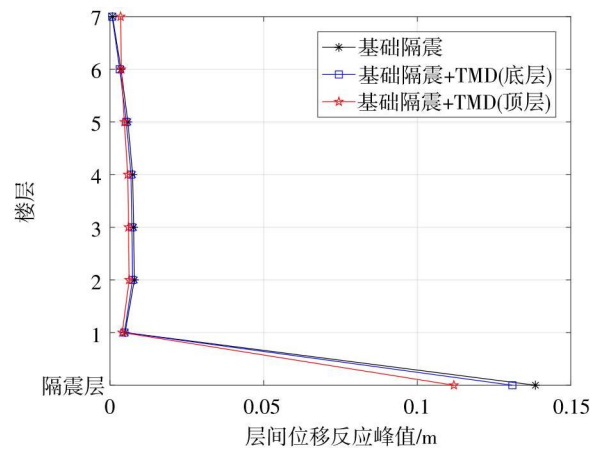


图 2 各楼层层间位移比较图

Fig.2 Comparison of floor displacement of each floor

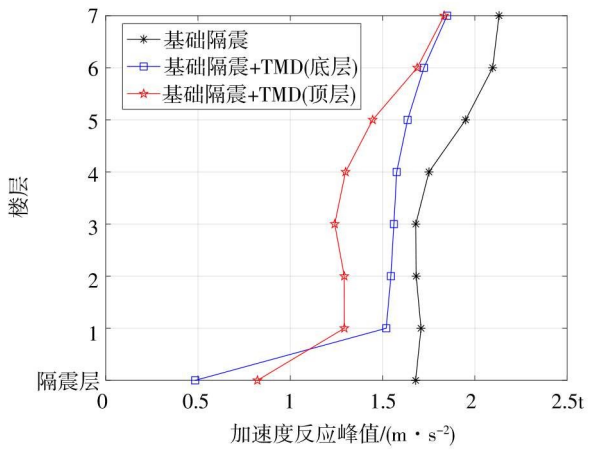


图 3 各楼层加速度峰值比较图

Fig.3 Comparison of peak acceleration of each floor

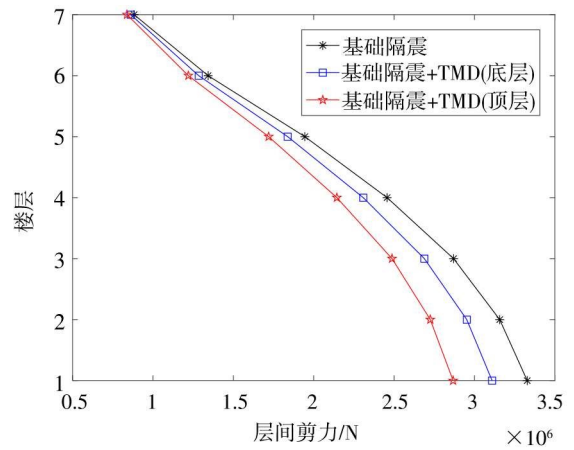


图 4 各楼层层间剪力比较图

Fig.4 Comparison of floor inter-story shear force of each floor

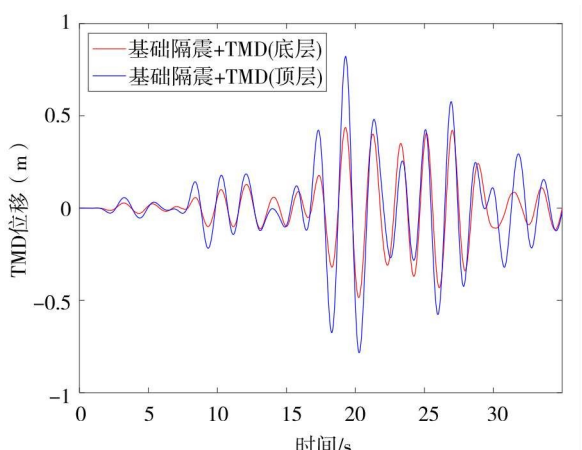


图 5 TMD 位移时程图

Fig.5 Comparison of floor displacement

表 3 各楼层层间位移峰值(cm)

Table 3 The peak value of interlayer displacement between the layers

层数	隔震层	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层	第六层	第七层
基础隔震	13.847	0.492	0.795	0.770	0.738	0.584	0.359	0.082
底层(TMD)	13.098	0.469	0.736	0.713	0.685	0.531	0.317	0.072
顶层(TMD)	11.193	0.398	0.625	0.603	0.577	0.468	0.368	0.346

表 4 各楼层加速度峰值(m/s²)

Table 4 Acceleration peaks for each floor

层数	隔震层	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层	第六层	第七层
基础隔震	1.679	1.708	1.682	1.680	1.751	1.950	2.096	2.131
底层(TMD)	0.485	1.520	1.545	1.561	1.577	1.636	1.724	1.850
顶层(TMD)	0.822	1.293	1.293	1.241	1.299	1.446	1.688	1.834

表 5 各楼层层间剪力(kN)
Table 5 Inter-layer shear force at each floor

层数	第一层	第二层	第三层	第四层	第五层	第六层	第七层
基础隔震	3 328.011	3 156.784	2 869.833	2 456.224	1 944.948	1 342.782	882.639
底层(TMD)	3 109.304	2 951.914	2 688.151	2 307.965	1 838.004	1 284.498	861.538
顶层(TMD)	2 867.046	2 725.008	2 486.972	2 143.870	1 719.750	1 220.233	838.530

由图 2 和表 3 可以看出,无论 TMD 位于混合减震体系的底层还是顶层,都能够减小隔震层的侧向位移。并且在基础隔震的基础之上,混合减震体系能够进一步的减小上部结构的层间位移。与基础隔震体系相比,TMD 位于基础隔震体系的底层时,隔震层和上部结构的层间位移分别减小了 5%左右,而 TMD 位于基础隔震体系的顶层时,隔震层和上部结构的层间位移分别减小了 20%左右。由此可知 TMD 位于混合减震体系的顶部能够更有效的减小隔震层和上部结构的层间位移。

由图 3 和表 4 可以知道,无论 TMD 位于混合减震体系的底层还是顶层,都能够减小隔震层和上部结构各层的加速度峰值。与基础隔震体系相比,TMD 位于结构的底层时,隔震层的加速度响应能够减小 70%,而 TMD 位于顶层时,隔震层的加速度响应能够减小 50%。可以看出,混合减震体系对于隔震层加速度峰值的控制效果非常理想。并且在基础隔震的基础之上,混合减震体系能够进一步的减小上部结构各层的加速度峰值,TMD 位于顶层时对于各层的加速度峰值能够减小 24%左右,而 TMD 位于底层时对于各层的加速度峰值能够减小 16%左右,可见 TMD 位于结构的顶层能够更有效的减小上部结构的加速度峰值。

由图 4 和表 5 可以看出,无论 TMD 位于混合减震体系的底层还是顶层,都能够减小上部结构各层的层间剪力,其中混合减震体系对于第一层的层间剪力的减小最为明显。TMD 位于结构的底层时,对第一层的层间剪力减小了 6%左右,TMD 位于结构的顶层时,对第一层的层间剪力减小了 14%左右。混合减震体系对于顶层的层间剪力的减小最不明显。TMD 位于结构的底层时,对顶层的层间剪力减小了 2.4%左右,TMD 位于结构的顶层时,对顶层的层间剪力减小了 5%左右。总体来说,TMD 位于结构的顶层能够更有效的减小结构的层间剪力。

图 5 为 TMD 的位移时程图,由图可知,当 TMD 位于混合减震体系顶层时,TMD 的最大位移

为 0.82m,TMD 位于混合减震体系底层时,TMD 的最大位移为 0.48m。可以判断,TMD 位于混合减震体系的底层时能够更有效的控制 TMD 的行程。

4 结论

本文就 TMD-基础隔震混合减震体系在强震下的地震响应进行求解分析。比较 TMD 位于混合减震体系顶层和底层两种情况下的结构响应,分析隔震层的位移、上部结构的位移、各层的加速度峰值、各层的层间剪力以及 TMD 的位移时程曲线四个指标得到以下结论:

- (1)相对于基础隔震结构而言,混合减震体系能够有效的减小隔震层的位移。相对于 TMD 位于底层的混合控制体系而言,TMD 位于顶层时不但能够更有效的减小隔震层的位移,而且还能够更有效的减小上部结构的层间位移响应。
- (2)相对于基础隔震结构而言,混合减震体系能够有效的减小各层的加速度峰值。并且与 TMD 位于底层相比,TMD 位于顶层能够更有效的减小上部结构的加速度峰值。与 TMD 位于顶部相比,TMD 位于底部能够更有效的减小隔震层的加速度响应,优于 TMD 位于顶部。
- (3)相对于基础隔震结构而言,混合减震体系能够有效的减小各层的层间剪力。无论 TMD 位于底层还是顶层,混合减震体系都是对第一层的剪力控制最优。与 TMD 位于底层相比,TMD 位于顶层时能够更有效的减小结构的层间剪力。
- (4)在 TMD-基础隔震混合减震体系中,相对于 TMD 位于结构的顶层而言,TMD 位于结构的底层时能够更有效的控制 TMD 的行程。

参考文献:

[1] 杜永峰. TMD-基础隔震混合控制体系随机响应分析[C]// 建筑结构高峰论坛. 建筑结构,2012.
[2] 邓林,沈小璞. 基础隔震与 TMD 混合控制系统减震效果分析[J]. 安徽建筑大学学报,2014,22(04):17-20.

- [3] 杜永峰,王亚楠,李慧. TMD-基础隔震混合控制体系随机响应分析[J]. 建筑结构,2012,42(S2):338-341.
- [4] 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(04):204-209.
- [5] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京:地震出版社,1997.
- [6] PALAZZO B,PETTI L.Seismic response control in base isolated systems using tuned mass dampers [C] // Proceedings of First World Conference on Structural Control, Los Angeles, California,1994.
- [7] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,2006.
- [8] 刘晶波,杜修力. 结构动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [9] 葛楠,苏幼坡,王兴国,等. 结构 TMD 控制及 AMD 最优控制减震效果计算研究[J]. 建筑科学,2017,33(03):7-13.
- [10] DE IULIS M,PETTI L,PALAZZO B. Combined control strategy base isolation and tuned mass damper:an effectiveness analysis of its application to non-linear benchmark base isolated structure [C] // The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing,2008.
- [11] FAHIMSADEK,BIJAN MOHRAZ,ANDREW W TAYLOR, et al. A method of estimating the parameters of tuned mass dampers for seismic applications [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997,26:617-635.
- [12] 欧进萍,王光远. 结构随机振动[M]. 北京:高等教育出版社,1998.