

近场脉冲型地震动作用下 TMD-基础隔震 混合控制结构的减震效果分析

李 慧^{1,2}, 王亚楠², 杜永峰^{1,2}

(1. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘 要:近场地震动具有很高的加速度峰值和长周期的速度脉冲,因此能够对结构造成严重的破坏。基础隔震是一种有效的减震技术,然而这种单一的减震手段在低频具有很高能量的近场脉冲型地震动作用下已不能确保结构的安全,必须寻求新的减震策略。本文将速度脉冲模型与随机地震地面运动模型联合来生成近场脉冲型地震动,并以此作为激励,用 MATLAB 对近场脉冲型地震动作用下 TMD-基础隔震混合控制结构及独立基础隔震结构的地震响应进行求解,比较研究该混合控制结构的减震效果。结果表明该混合控制方式可以有效地控制结构的位移,而对加速度的控制效果不明显。

关键词:近场地震动;速度脉冲;TMD;基础隔震;混合控制

中图分类号: TU352.1+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0844(2013)02-0208-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0208

An Effectiveness Analysis on Hybrid Control System of Tuned Mass Damper-base Isolation under Near-fault Pulse-like Ground Motion

LI Hui^{1,2}, WANG Ya-nan², DU Yong-feng^{1,2}

(1. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou Univ. of Tech, Lanzhou, Gansu 730050, China))

Abstract: Near-fault ground motions can cause severe damage to structures because of its high peak accelerations and macrocyclic velocity pulses. In the last two decades, the seismic isolation technique, which was proved to be very effective for the seismic protection of new constructions and the seismic retrofitting of existing ones, had been applied for buildings, bridges, industrial facilities, and structures of historical value as well. As a consequence, design guidelines for seismically isolated structures have been developed in many countries with a high seismic hazard. The insertion of an isolation system at the base of a building structure allows the horizontal seismic loads to be reduced through a decoupling of the structure motion from that of the soil; moreover, the superstructure behaves like a fixed or base isolated structure along the vertical direction, depending on the value, respectively very high or very low, of the ratio between the vertical stiffness of the isolator and the horizontal one. Base isolation technique, taken as an effective method to control structure's vibration that is induced by earthquake ground motions, has been widely accepted, however, only such an approach can not ensure structure's safety under near-fault pulse-

收稿日期:2011-12-21

基金项目:国家自然科学基金(50978130)

作者简介:李 慧(1954-),女(汉族),陕西西安人,教授,博士生导师,主要从事土木工程、防震减灾等方面的研究。

通讯作者:王亚楠,E-mail:pansidong311@163.com

like ground motions with high energy in low frequency band, because strong near-fault ground motions are characterized by long-duration horizontal pulses and very large displacements, which can lead to an oversizing of the isolation system and an amplification of the response of a base isolated structure. Specifically, the frequency content of the motion transmitted by the isolators to the superstructure can become critical when the pulse intensity is so strong that the superstructure undergoes plastic deformations. Moreover, the structural response can be amplified due to the long duration of the pulse. To overcome these problems, many authors have proposed a lot of solutions based on different kinds of isolators and dampers. Nevertheless, some problems remain unsettled if additional damping is adopted, because the displacements at the top of the isolators can be substantially reduced, but the contribution of the higher vibration modes of the superstructure increases, if this contribution becomes too large, it can give rise to significant increase in inter-story drifts and floor accelerations, so it is necessary to find more effective vibration control strategies. A pulse model and a stochastic ground motion model are combined to simulate the near-fault ground motions. The simulation of directivity pulse type ground motions through superimposition of modeled directivity pulse on a non-pulse type motion is a possible approach to meet the scarcity of such motions in studying the structural response. Typically, pulse duration or period, pulse amplitude, and the number and phase of half cycles constituting the pulse have been considered as the parameters which are necessary for such a characterization.

The structure dynamic responses are solved by using MATLAB under these artificial ground motions. The effectiveness of TMD-Base isolation hybrid control method is studied through the comparisons of response time histories of a base isolated structure with and without TMD. The results show that this hybrid control method is capable of controlling isolation layer's displacement effectively.

Key words: Near-fault ground motion; Velocity pulse; Tuned Mass Damper(TMD); Base isolation; Hybrid control

0 引言

近场地震动发生在地震断裂带附近,以长周期的速度脉冲和高峰值的加速度为特征。近年来发生的几次近场地震对建筑物造成了严重的破坏并带来了巨大的人员伤亡,因此引起了越来越多的研究者的关注。基础隔震作为一种有效的减震技术,能够减小上部结构的响应,但是当结构遭受近场地震动作用时,隔震垫将发生很大的变形,甚至导致隔震垫的屈曲或破裂^[1-2]。常用限制隔震层位移的方法是设置限位器或在隔震层增设阻尼器,尽管它可以减小隔震层的位移,但将增加结构高阶模态的加速度和变形,增大结构的层间位移^[3]。鉴于此,许多研究者已经致力于寻找一些更为有效的方法来保证结构在近场地震作用下的可靠性。

研究发现对于设计良好的基础隔震结构,在地震动作用下结构的响应主要表现为一阶振型的平动^[4],而 TMD 通过调谐结构的频率能够有效减小结构某一特定振型的振动,因此根据两者的特点把

它们联合起来运用到结构抗震上的思想已经被 Pallazzo 和 Petti^[5]提了出来。根据 De Iuliis^[6]的研究,TMD-基础隔震体系减震控制的有效性随着输入地震动特性的不同将发生显著的变化。

由于近场脉冲型地震动记录数量的有限性使得关于近场地震对结构影响的系统研究受到了限制。在过去的十几年里很多学者^[7-8]研究并提出了多种用于模拟近场地震动长周期脉冲部分的速度脉冲模型。本文采用 He 和 Agrawal^[9]提出的速度脉冲模型和随机地震地面运动模型联合来生成近场脉冲型地震动,该模型的有效性已经通过与大量实际地震动记录的比较得到了证实^[10];运用 MATLAB 软件,采用状态空间法对有 TMD 和无 TMD 的基础隔震结构在近场脉冲型地震动作用下的响应进行求解,研究基础隔震与 TMD 混合控制手段的减震效果。

1 人工合成近场地震动

1.1 速度脉冲模型

通过选择合适的参数,He-Agrawal 速度脉冲模型可以成功地模拟近场地震记录中的速度脉冲部分。模型表达式如下:

$$\dot{u}_p = Ct^n e^{-at} \sin \omega_p t \quad (1)$$

式中, \dot{u}_p 为脉冲速度; n 为包络线形状参数, 与脉冲幅值的增加速度有关, 是非负整数; a 为脉冲衰减因子; ω_p 为脉冲频率; C 为幅值比例因子。

对式(1)进行微分可以得到相应的脉冲加速度表达式:

$$\ddot{u}_p = Ct^n e^{-at} [(n/t - a) \sin \omega_p t + \omega_p \cos \omega_p t] \quad (2)$$

式中各参数含义与式(1)中相同, 文献[9]已经对这些参数的取值范围进行了统计。

1.2 随机地震地面运动模型

采用 Kanai-Tajimi 模型来生成随机地震地面运动^[11]:

$$S_{\ddot{x}_g}(w) = \frac{w_g^4 + 4\zeta_g^2 w_g^2 w^2}{(w^2 - w_g^2)^2 + 4\zeta_g^2 w_g^2 w^2} S_0 \quad (3)$$

式中, S_0 为谱强度; w_g 和 ζ_g 分别为场地的特征频率和特征阻尼比。

运用三角级数法来生成地震动:

$$a(t) = f(t) \sum_{k=1}^N A_k \cos(\omega_k t - \psi_k) \quad (4)$$

式中, A_k 和 ω_k 是第 k 个频率分量的幅值和频率大小; ψ_k 是位于 $[0, 2\pi]$ 之间均匀分布的随机相位角; $f(t)$ 为加速度的强度包络线函数, 通常表示为

$$f(t) = \begin{cases} (t/t_1)^2 & 0 \leq t \leq t_1 \\ 1 & t_1 < t \leq t_2 \\ e^{-c(t-t_2)} & t_2 < t \end{cases} \quad (5)$$

式中, $0 \sim t_1$ 地震动上升段; $t_1 \sim t_2$ 为水平段; 从 t_2 到结束为衰减段; c 为衰减系数。

1.3 人工合成地震动

通过选择合适的脉冲参数可以得到不同形式的脉冲, 大致分为前向脉冲、前后向脉冲以及多重脉冲, 分别如图 1 中(a)、(b)、(c)所示。

当 Kanai-Tajimi 模型中的参数给定时, 运用式(4)可以生成如图 2 所示的地震动。

采用文献[8]建议的方法, 运用式(6)经调幅可以将速度脉冲与随机地面地震动联合起来生成波形如图 3 所示的脉冲型地震动:

$$\ddot{u}_g(t) = (1 - \alpha)\ddot{u}_{gF} + \alpha\ddot{u}_{gN} \quad (6)$$

式中, α 为脉冲部分 \ddot{u}_{gN} 的贡献因子, $1 - \alpha$ 为随机地震动 \ddot{u}_{gF} 的贡献因子。

2 TMD-基础隔震体系的减震效果分析

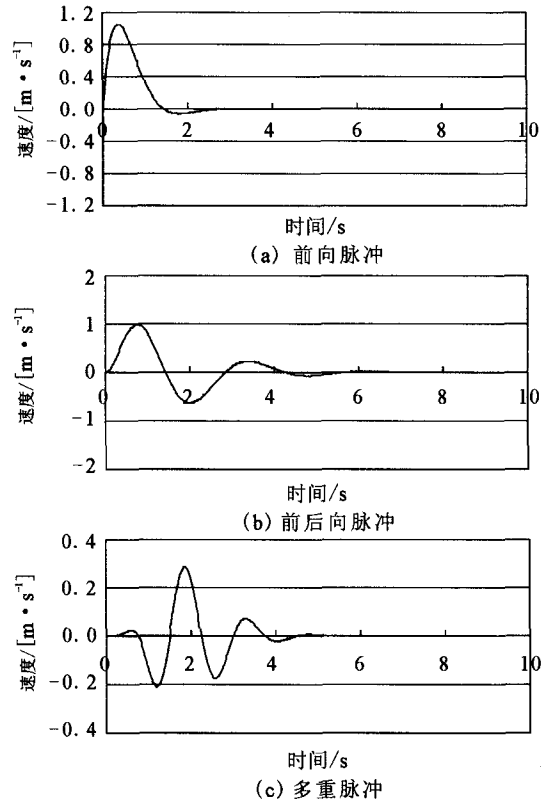


图 1 不同形式速度脉冲

Fig. 1 Various forms of velocity pulses.

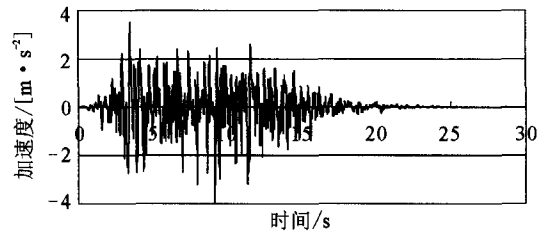


图 2 加速度时程

Fig. 2 Acceleration time history.

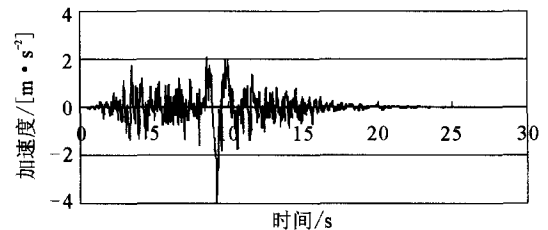


图 3 人工合成脉冲型地震动

Fig. 3 Synthetic pulse-like ground motion.

2.1 结构运动方程

以某 8 层 TMD-基础隔震混合控制结构作为算例进行分析, 结构模型如图 4 所示。用集中质量法将该结构离散化为一串联多自由度体系作为本文计算模型, 建立结构运动方程:

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = M\ddot{u}_g \quad (7)$$

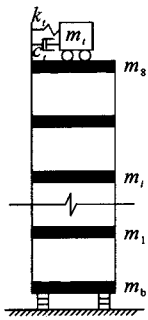


图 4 结构模型
Fig. 4 Structure model.

式中, Y 表示结构相对于地面的位移向量; \ddot{u}_g 为输入地震动; I 为输入地震动的位置向量; M, C, K 分别为结构的质量、阻尼和刚度矩阵, 分别表示如下:

$$M = \begin{bmatrix} m_b & & & & & & & & \\ & m_1 & & & & & & & \\ & & \ddots & & & & & & \\ & & & m_8 & & & & & \\ & & & & & & & & m_t \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_b + k_1 & -k_1 & & & & & & & \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & & & & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & & & & \\ & & & -k_8 & k_8 + k_t & -k_t & & & \\ & & & & -k_t & k_t & & & \\ & & & & & & & & \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} c_b + c_1 & -c_1 & & & & & & & \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 & & & & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & & & & \\ & & & -c_8 & c_8 + c_t & -c_t & & & \\ & & & & -c_t & c_t & & & \end{bmatrix}$$

式中, m_b 为隔震层质量, $m_1 \sim m_8$ 为上部结构各层质量, m_t 为 TMD 质量; c_b 为隔震层阻尼系数, $c_1 \sim c_8$ 为上部结构各层阻尼系数, c_t 为 TMD 的阻尼系数; k_b 为隔震层刚度, $k_1 \sim k_8$ 为上部结构各层刚度, k_t 为 TMD 刚度。

2.2 TMD 参数求解

TMD 减震控制体系由主结构和附加在主结构上的子结构组成, 通过调整子结构的自振频率, 使其尽量与主结构的基本频率或激振频率接近来对主结构的地震响应进行控制。为了使 TMD 充分发挥它的调谐作用, 必须选择合适的参数(子结构的质量、刚度以及阻尼), 本文采用下式来确定所需参数^[12]:

$$f_{opt} = \frac{\sqrt{1-\mu/2}}{1+\mu} \tag{8}$$

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{\mu(1-\mu/4)}{4(1+\mu)(1-\mu/2)}} \tag{9}$$

式中, f_{opt} 为子结构和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, 通常情况下子结构的质量取为主结构质量的 1%~5%。一旦确定了质量比, 由式(8)、式(9)可以求得子结构的频率和阻尼比, 再根据式(10)、式(11)和式(12)就可以求得子结构的质量、刚度和阻尼:

$$m_t = \mu(m_b + \sum_{i=1}^n m_i) \tag{10}$$

$$k_t = m_t f_{opt}^2 \omega_0^2 \tag{11}$$

$$c_t = 2\xi_{opt} \sqrt{k_t m_t} \tag{12}$$

式中, ω_0 为主体结构的自振频率, 其余参数同前。

2.3 减震效果分析

用 MATLAB 编程, 生成具有不同脉冲周期 (T_p 分别为 1 s, 1.5 s, 2 s, 2.5 s, 3 s, 3.5 s, 4 s) 的

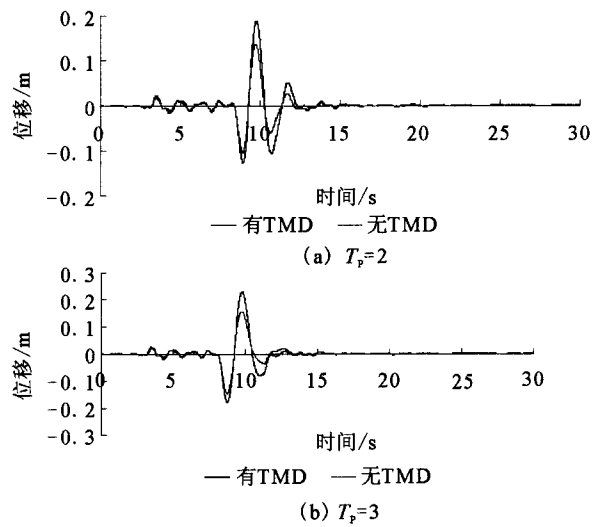


图 5 隔震层位移时程
Fig. 5 Isolation layer displacement time history.

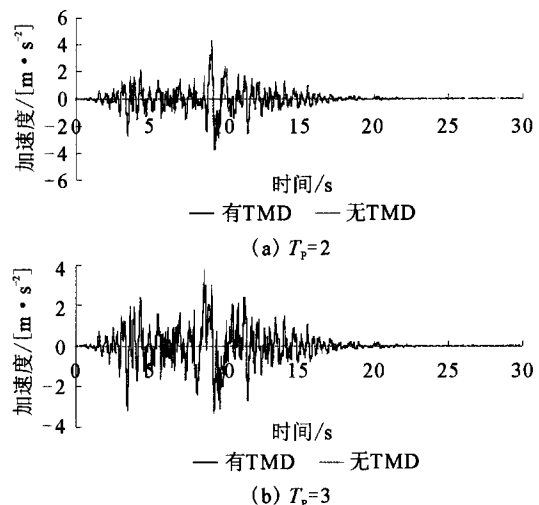


图 6 顶层加速度时程

Fig. 6 Top floor acceleration history.

人工近场地震动,采用状态空间法进行无 TMD 和有 TMD 结构的地震响应分析。

图 5 分别列出 $T_p=2$ 及 $T_p=3$ 时隔震层位移时程曲线。从图中可以看出在速度脉冲型地震动作用下,有 TMD 结构的隔震层位移得到了控制,防止隔震垫过早出现屈服、拉裂等现象,减小幅度通过图 7 可以看出来。同时,在长脉冲周期地震动作用下隔震层位移响应要大很多。

图 6 分别列出了 $T_p=2$ 及 $T_p=3$ 时结构顶层加速度时程曲线。由图可知 TMD 对结构加速度的减震效果并不明显,但与通过增设阻尼器来减小结构地震响应的减震方式相比,TMD—基础隔震混合控制方式并不会显著增加上部结构的加速度。

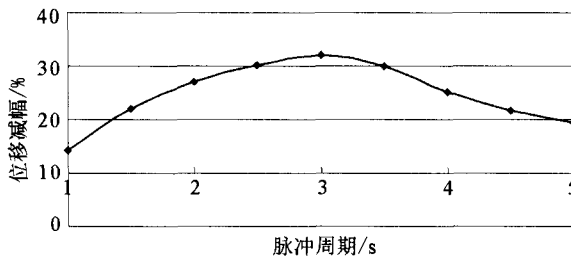


图 7 隔震层位移减幅曲线

Fig. 7 Decreasing percentage curve of isolation layer displacement.

图 7 为在不同脉冲周期的地震动作用下,隔震层位移的减幅(无 TMD 结构和有 TMD 结构隔震层位移峰值的差值与无 TMD 结构隔震层位移峰值的比值),由图可知,在 T_p 位于 3 s 时减幅最大,这是因为结构的基本周期接近于 3 s,这时结构处于类共振阶段,能更好的激起 TMD 的运动,从而达到减震的效果。

3 结语

本文用 MATLAB 编程,采用状态空间法对 TMD—基础隔震混合控制体系进行了减震效果分析,得出主要结论如下:

- (1) TMD—基础隔震混合控制方式可以有效的控制结构在速度脉冲型地震动作用下的位移响应;
- (2) 该混合控制方式对结构加速度响应的控制效果并不明显;
- (3) 随着脉冲周期的增大,隔震层的位移响应有增大趋势,在某些具有长周期速度脉冲的地震动作用下隔震层位移仍有可能超出限值,需采取其它有效措施。

【参考文献】

- [1] Agrawal A K, Xu Z, He W L. Ground Motion Pulse-based Active Control of A Linear Base-isolated Benchmark Building [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2006, 13(2): 792-808.
- [2] Nagarajaiah S, Ferrell K. Stability of Elastomeric Seismic Isolation Bearings [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1999, 125(9): 946-954.
- [3] Kelly J M. *Earthquake-resistant Design with Rubber* (2nd Edn). [M]. Springer, New York: [s. n.], 1997 (ISBN: 3540761314).
- [4] 周福霖. 工程结构减震控制 [M]. 北京:地震出版社, 1997: 3-10.
ZHOU Fu-lin. *Vibration Control of Structural Engineering* [M]. Beijing: Earthquake Press, 1997, 3-10.
- [5] Palazzo B, Petti L. Seismic Response Control in Base Isolated Systems Using Tuned Mass Dampers [A]//*Proceedings of First World Conference on Structural Control* [C]. Los Angeles, California: *Proceedings of First World Conference on Structural Control*, 1994, 275: 155-165.
- [6] De Iuliis 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 [A]//*World Conference on Earthquake Engineering* [C]. Beijing, China: *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008.
- [7] Dickinson Bryce W, P Gavin Heri. Parametric Statistical Generalization of Uniform—Hazard Earthquake Ground Motions [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 137(3): 410-422.
- [8] LIN Chi-chang, CHEN Chi-lun, WANG Jer-fu. Vibration Control of Structures with Initially Accelerated Passive Tuned Mass Dampers under Near-fault Earthquake Excitation [J]. *Computer—Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2010, 25(1): 69-75.
- [9] He W L, Agrawal A K. Analytical Model of Ground Motion Pulses for the Design and Assessment of Seismic Protective Systems [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(7): 1177-1188.
- [10] Tan P, Agrawal A K, Pan Y. Near-field Effects on Seismically Excited Highway Bridge Equipped with Nonlinear Viscous Dampers [J]. *Bridge Structures*, 2005, 1(3): 307-318.
- [11] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学 [M]. 北京:机械工业出版社, 2005: 262-264.
LIU Jing-bo, DU Xiu-li. *Dynamics of structure* [M]. Beijing: Machine Press, 2005: 262-264.
- [12] Sadek Fahim, Mohraz Bijan, Taylor Andrew W, et al. A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Dampers For Seismic Applications [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1997, 26(6): 617-635.
- [13] 杜永峰, 张尚荣, 李慧. 多级串联非比例阻尼隔震结构地震响应分析 [J]. *西北地震学报*, 2012, 34(4): 319-323.
DU Yong-feng, ZHANG Shang-rong, LI Hui. *Seismic Response Analysis on Multistage Series Non-proportion Damping Isolated Structure* [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2012, 34(4): 319-323.