

脉冲型地震动作用下隔震结构动力响应的影响 参数研究^①

王亚楠¹, 杜永峰², 李慧²

(1. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 兰州理工大学 防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘要:通过对隔震结构进行非线性动力响应分析, 分别研究地震动参数和支座参数对结构地震响应的影响。首先, 建立铅芯橡胶支座基础隔震结构的非线性运动方程; 然后, 以人工合成脉冲型地震动作为输入, 运用 MATLAB 进行编程并求解结构在脉冲型地震动作用下的地震响应; 最后, 分别研究速度脉冲周期、支座屈服力、屈服后与屈服前的刚度比对隔震支座最大位移和上部结构层间位移的影响。研究结果表明, 脉冲周期对结构地震响应影响很大, 在进行隔震设计时应使结构自振周期远离脉冲周期; 支座刚度比对结构地震响应影响较大, 在进行支座选型时应重点关注; 支座屈服力对支座位移的影响显著, 屈服力越大, 支座位移越小。

关键词: 基础隔震结构; 脉冲型地震动; 非线性分析; 速度脉冲周期

中图分类号: TU311.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)05-0707-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.05.0707

Parametric Study on Dynamic Response of Base-isolated Structure Subjected to Pulse-like Ground Motions

WANG Ya-nan¹, DU Yong-feng², LI Hui²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: The use of base-isolation technology to resist earthquake damage has attracted much attention since its appearance. Many researchers at home and abroad have conducted studies focused on base-isolated structures under seismic ground motions. Near-fault pulse-like ground motions comprise a velocity or displacement pulse component and other components. Some research results showed that near-fault pulse-like ground motions can cause severe damage to structures. Seismic responses of base-isolated structures under near-fault ground motions have attracted much attention in recent years. Synthetic ground motions were used as input, then the influence of ground motion parameters and isolation-bearing parameters on base-isolated structural seismic responses were analyzed on the basis of nonlinear dynamic time-history analysis. First, a nonlinear motion equation of a base-isolated structure was established. Second, the structural nonlinear dynamic responses were solved under synthetic pulse-like ground motions by using MATLAB. And last, the effects of the velocity pulse period, the yield force of the isolation bearing, and the stiffness ratio of the isolation bearing on dynamic response of the isolation layer and superstructure were studied. Research results show that the effect of the velocity pulse period on the structural dynamic response was great, and the structural natural period should be distant from the

① 收稿日期: 2015-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(51178211); 西安工大校长基金(XAGDXJJ15021)

作者简介: 王亚楠(1986—), 男, 博士, 讲师, 从事结构工程抗震研究。E-mail: yanananwang_xatu@163.com。

pulse period. The influence of the stiffness ratio on structural response was significant, and it should be taken seriously when choosing isolation bearings. The yield force of the isolation bearing had a great influence on bearing displacement, and when the yield force became greater, the bearing displacement became smaller.

Key words: base-isolated structure; pulse-like ground motions; nonlinear analysis; velocity pulse period

0 引言

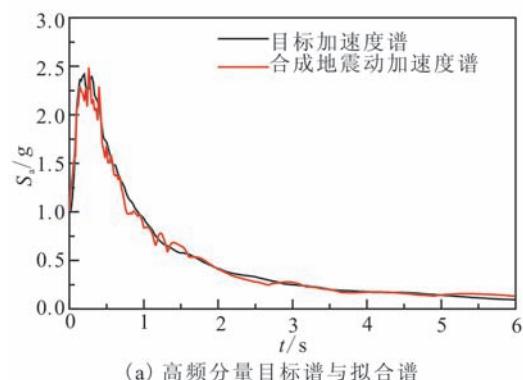
近年来,随着地震记录的不断丰富,人们对地震动特征、地震动选取准则、地震动人工拟合方法以及地震动对结构影响等问题的研究和认识越来越深入。其中存在一类特殊问题,即与近断层地震动相关联的问题,早在 50 多年前就已经受到研究者们的关注,现如今仍然是许多研究者的重点研究对象^[1-3]。隔震技术作为一种有效的振动控制技术已经大量应用于土木工程领域。基础隔震结构便是隔震技术应用于土木工程领域后形成的一类特种结构,由于其控震原理明确且易于工程实践,从被提出至今已经受到了研究者们的广泛关注,并围绕其开展了多方面的研究^[4-7]。其中关于隔震结构在近断层地震动作用下的表现问题是近年来地震工程领域的研究热点之一,国内外许多研究者围绕该问题展开了研究。Jangid^[8]研究了近断层地震作用下上部结构刚度、隔震周期以及隔震垫屈服强度等参数对顶层绝对加速度和隔震支座位移的影响。Ozdemir 等^[9]研究了近断层地震动的两个正交分量对隔震支座最大位移的贡献程度以及采用等效抗侧力方法估算隔震支座最大位移的可行性。Vassiliou 等^[10]研究了脉冲型地震动作用下隔震支座屈服强度、对应的位移延性需求和结构基本周期之间的关系。杨迪雄等^[11]研究了破裂前向效应与滑冲效应对隔震结构地震响应的影响。叶昆等^[12]研究了基础隔震结构在近断层地震动作用下的动力反应特征以及地震动参数和隔震支座力学性能对上部结构峰值绝对加速度和隔震层最大位移的影响。韩森等^[13]研究了近断层地震动特征参数与基础隔震结构地震响应之间的关系。李慧等^[14-15]对近断层脉冲型地震动作用下适用于隔震结构的反应谱以及 TMD-基础隔震混合控制体系的地震响应进行了分析。

本文以人工合成脉冲型地震动作为输入,通过对隔震结构进行非线性动力响应分析,分别研究地震动参数和支座参数对结构地震响应的影响。

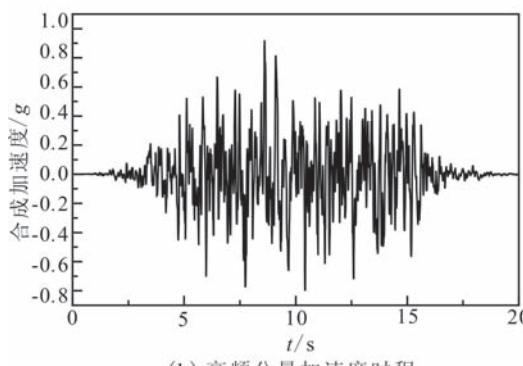
1 人工合成脉冲型地震动

脉冲型地震记录中不仅包含长周期脉冲分量,还包含其他高频分量,因此在合成脉冲型地震动时分别合成低频脉冲分量和高频分量,然后将两个分量按照一定的法则^[16],即确定脉冲峰值出现的时刻进行叠加来合成脉冲型地震动。

图 1 所示为通过拟合目标谱而得到的脉冲型地震动的高频分量及其对应加速度响应谱。从图中可以看出,合成高频分量的加速度谱与目标谱有较高的致性。



(a) 高频分量目标谱与拟合谱



(b) 高频分量加速度时程

图 1 人工合成高频分量

Fig.1 Artificial synthetic high frequency component

图 2 所示为利用 He-Agrawal 模型^[17]合成的速度脉冲分量与脉冲型地震记录速度时程之间的对比。从图中可以看出,速度脉冲模型能够很好地模拟脉冲型地震记录速度时程中所包含的速度脉冲部

分,因此利用该模型合成速度脉冲分量比较切合实际。

图3所示为采用叠加法合成的速度脉冲周期的脉冲型地震动。从速度时程的波形中可以明确区分出脉冲特征,验证了文中所用方法的合理性。

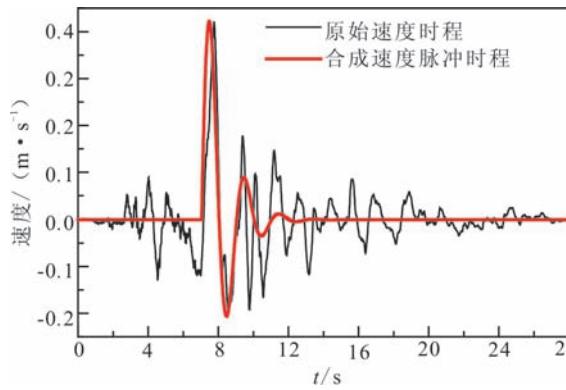


图2 脉冲分量的人工合成

Fig.2 Artificial synthesis of pulse component

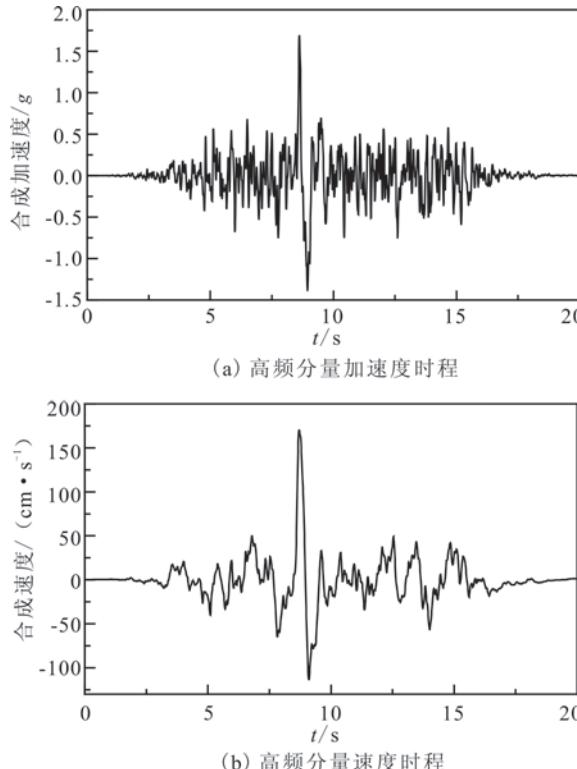


图3 人工合成脉冲分量

Fig.3 Artificial synthetic pulse component

2 计算模型及运动方程

2.1 工程概况

以某8层钢筋混凝土框架结构为例,各层层高均为3.3 m,房屋总高度26.4 m,结构的梁、柱平面布置见图4。结构的抗震设防类别为丙类,设计地

震分组为第二组,场地类别Ⅱ类,抗震设防烈度为Ⅷ度0.2g。构件尺寸:梁为250 mm×500 mm,柱为600 mm×600 mm,板厚为100 mm。梁、柱材料均采用C30混凝土。梁、柱纵向钢筋均为HRB400。板面恒荷载为5 kN/m²(包含楼板自重),活荷载为2.0 kN/m²。

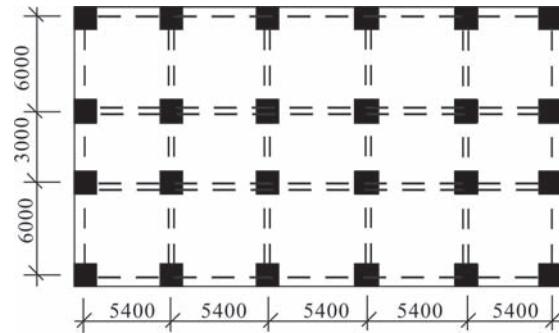


图4 结构平面布置图(单位:mm)

Fig.4 Layout map of the structure (Unit:mm)

2.2 计算模型及运动方程

考虑到隔震结构自身特点,文中采用层间剪切模型作为其简化计算模型进行分析。图5所示为基础隔震结构计算模型。

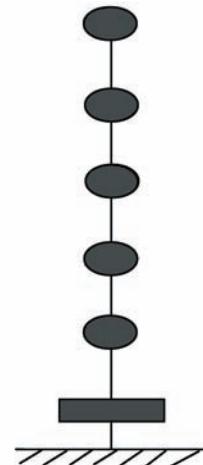


图5 隔震结构及其计算模型

Fig.5 The base-isolated structure and its calculation model

根据图5所示简化计算模型建立基础隔震结构在地震作用下的运动方程,考虑隔震支座的非线性力-变形行为,采用Bouc-Wen模型进行描述,其表达式为:

$$\ddot{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{X}} + \dot{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{F} = -\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_g \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为体系的质量矩阵; \mathbf{C} 为体系的阻尼矩阵; $\dot{\mathbf{X}}$ 和 $\ddot{\mathbf{X}}$ 分别为体系的相对速度和相对加速度列向量; \mathbf{I} 为表示地震作用位置的列向量,各元素均为1; $\ddot{\mathbf{x}}_g$ 为地震动加速度; \mathbf{F} 为体系的恢复力列向量,由

弹性恢复力和滞回力两部分组成,具体表达式为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{KX} + \mathbf{H}(1-\alpha)F_yZ \quad (2)$$

$$\text{其中: } \mathbf{K} = \begin{bmatrix} \alpha k_b + k_1 & -k_1 & & \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & \\ & \ddots & & \\ & & -k_8 & k_8 \end{bmatrix}$$

式中: \mathbf{K} 为体系的刚度矩阵; \mathbf{X} 为体系的相对位移列向量; \mathbf{H} 为表示隔震层无量纲滞变分量位置的列向量,在本模型中 $\mathbf{H} = [1, 0, \dots, 0]^T$; Z 为隔震支座的无量纲滞变分量,其表达式为:

$$x_y \dot{Z} = Ax_b - \gamma |\dot{x}_b| |Z| Z^{\eta-1} - \beta \dot{x}_b |Z|^{\eta} \quad (3)$$

式中: x_b 为隔震层的位移响应, x_y 为隔震支座的屈服位移; A 、 γ 、 β 和 η 为控制滞回环形状的参数,文中分别取 $A=1$ 、 $\gamma=0.5$ 、 $\beta=0.5$ 和 $\eta=0.5$ 。

采用状态空间描述法将运动方程改写为一阶微分方程的形式,运用四阶龙格库塔法进行求解可以得到隔震结构在地震作用下的非线性地震响应。

2.3 结构基本参数

文中根据《建筑抗震设计规范》中有关隔震结构设计的条文和隔震支座生产厂家提供的支座性能指标,最终选取的隔震支座基本参数见表1。

表 1 隔震支座基本参数

Table 1 Basic parameters of the isolated bearing

型号	竖向刚度 /(kN·mm ⁻¹)	屈服前刚度 /(kN·mm ⁻¹)	屈服后刚度 /(kN·mm ⁻¹)	屈服力 /kN
LRB500	1 764	5.167	0.795	65.3

采用动力时程法对隔震结构进行计算时,所需计算参数见表2。

表 2 基础隔震结构基本参数

Table 2 Basic parameters of the base-isolated structure

层号	隔震层	1	2	3~7	8
质量/T	510	356	356	356	356
刚度 (10 ⁵ kN·m ⁻¹)	1.3(屈前)	8.9	5.0	4.4	3.6 (屈后)

3 参数影响分析

图6(a)和(b)所示分别为速度脉冲周期对隔震支座最大位移响应和上部结构最大层间位移响应的影响。从图中可以看出,随着速度脉冲周期的增大,隔震支座最大位移响应和上部结构最大层间位移响应呈先增大后减小的趋势,即对于某一具体隔震结构而言,存在一个临界速度脉冲周期值,当脉冲型地震振动的速度脉冲周期值等于该值时,隔震支座位移响应和上部结构层间位移响应最大,对结构的影响最

不利。另外,从图中还可以看出曲线的斜率较大,说明结构的地震响应对速度脉冲周期的变化很敏感,速度脉冲周期是影响结构地震响应的重要参数。

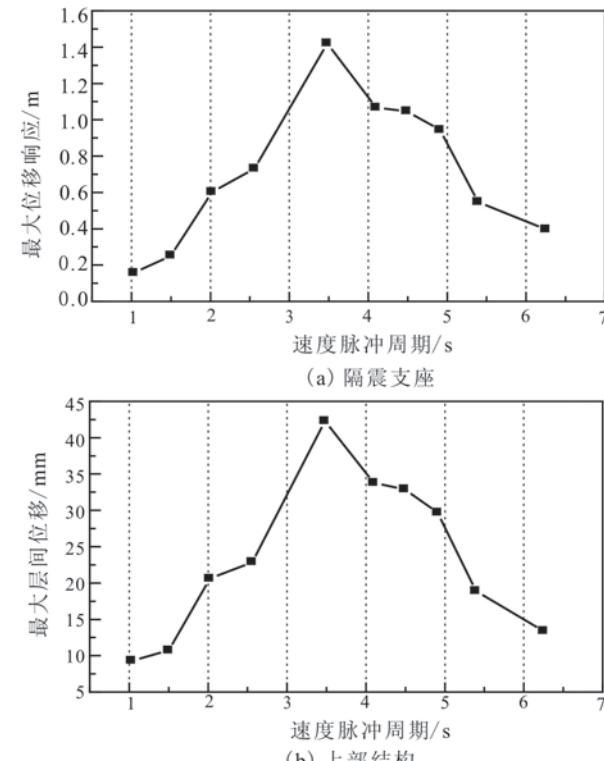


图 6 脉冲周期对结构地震响应的影响

Fig.6 Influence of the pulse period on seismic response of the structure

图7(a)和(b)所示分别为屈服力对隔震支座最大位移响应和上部结构最大层间位移响应的影响。从图中可以看出,随着屈服力的增加,隔震支座最大位移响应呈减小的趋势,而上部结构最大层间位移响应则呈现出先减小后增大的趋势。因此在隔震结构的设计过程中,对隔震支座进行选型时需要同时考虑隔震支座极限变形以及上部结构层间位移响应限值这两方面要求,通过权衡利弊来选取最为合适的隔震支座。此外,从变化的幅度来看,隔震支座最大位移响应的变幅相对较大,而上部结构最大层间位移响应的变幅较小,说明支座屈服力是影响隔震支座响应的重要参数,而对上部结构地震响应的影响不明显。

图8(a)和(b)所示分别为刚度比对隔震支座最大位移响应和上部结构最大层间位移响应的影响。从图中可以看出,随着刚度比的增加,隔震支座最大位移响应先增加后减小,而上部结构的最大层间位移响应则呈增长趋势。因此在选取隔震支座的型号

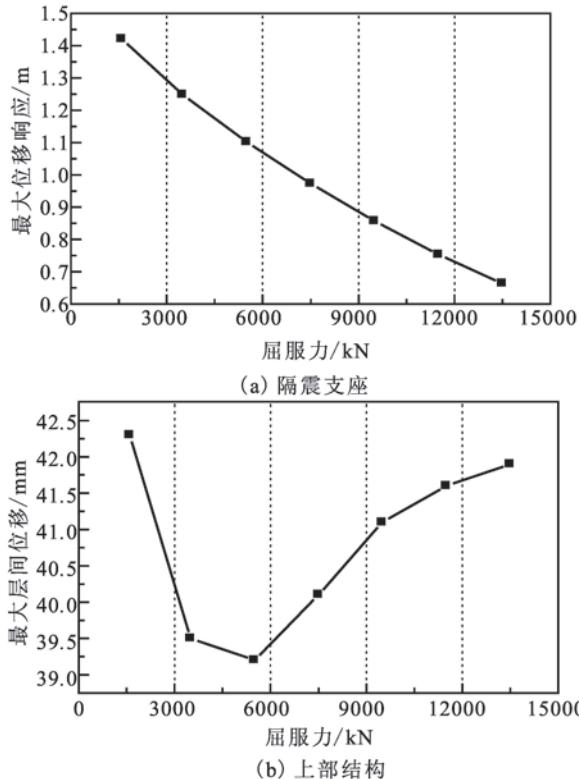


图 7 支座屈服力对结构地震响应的影响

Fig.7 Influence of the yield force of bearing on seismic response of the structure

时尚需考虑屈服后与屈服前刚度比对结构地震响应的影响。另外,无论是隔震支座还是上部结构,两者响应曲线的斜率均较大,说明这两者的地震响应均对屈服后与屈服前刚度比的变化较为敏感,即刚度比是影响结构地震响应的重要参数。

4 结论

文中以某8层钢筋混凝土框架基础隔震结构为例,以人工合成脉冲型地震动为输入,分别研究了地震动参数和支座参数对结构地震响应的影响,并得到以下结论:

(1) 存在一个临界速度脉冲周期值,使得隔震支座和上部结构层间位移响应最大,对结构的影响最不利,在进行隔震结构设计时应使结构基本周期远离该值。

(2) 支座屈服力对隔震支座位移响应的影响非常显著,屈服力越大支座的变形越小;而对上部结构层间位移响应的影响并不明显。

(3) 屈服后与屈服前刚度比对上部结构和隔震支座位移响应的影响均较明显,在隔震支座选型中应重点关注。

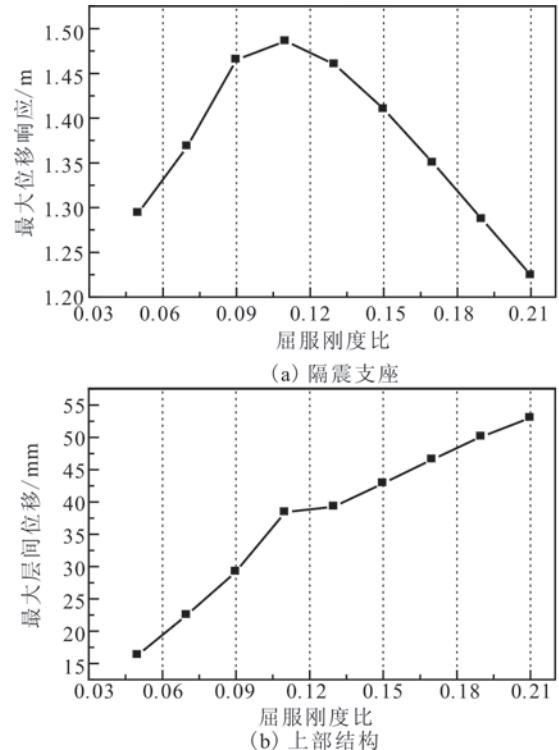


图 8 支座屈服刚度比对结构地震响应的影响

Fig.8 Influence of the stiffness ratio on seismic response of the structure

参考文献(References)

- [1] Mollaioli F, Bosi A. Wavelet Analysis for the Characterization of Forward Directivity Pulse Like Ground Motions on Energy Basis[J]. Meccanica, 2012, 47(1): 203-219.
- [2] Mukhopadhyay S, Gupta V K. Directivity Pulses in Near Fault Ground Motions- I : Identification, Extraction and Modeling [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 2(1): 38-52.
- [3] Sehhati R, Adrian R M, Mohamed E. Effects of Near Fault Ground Motions and Equivalent Pulses on Multi-story Structures[J]. Engineering Structures, 2011, 33(1): 767-779.
- [4] 洪峰,王前信.基底隔震结构的研究和应用[J].世界地震工程,1994(2):21-25.
HONG Feng, WANG Qian-xin. Research and Application of Base-isolated Structures [J]. World Earthquake Engineering, 1994(2): 21-25.(in Chinese)
- [5] 施卫星,李正升.基础隔震结构设计反应谱[J].工程力学,1998,15(增刊):115-121.
SHI Wei-xing, LI Zheng-sheng. Design Spectrum of Base-isolated Structure[J]. Engineering Mechanics, 1998, 15(Supp): 115-121.(in Chinese)
- [6] 朱宏平,周方圆,袁涌.建筑隔震结构研究进展与分析[J].工程力学,2014,31(3):1-10.
ZHU Hong-ping, ZHOU Fang-yuan, YUAN Yong. Development and Analysis of the Research on Base-isolated Structures

- [J].Engineering Mechanics,2014,31(3):1-10.(in Chinese)
- [7] 赵桂峰,马玉宏,谭平,等.高层RC框架剪力墙隔震结构地震风险分析[J].地震工程与工程振动,2015,35(2):30-38.
ZHAO Gui-feng, MA Yu-hong, TAN Ping, et al. Comparative Analysis of Seismic Risk for High-rise RC Frame-shear Wall Buildings with or without the Isolated Layer[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35(2): 30-38. (in Chinese)
- [8] Jangid R S.Optimum Lead Rubber Isolation Bearings for Near Fault Motions[J].Engineering Structures, 2007, 29(1): 2503-2513.
- [9] Ozdemir G,Akyuz U.Dynamic Analyses of Isolated Structures under Bi-directional Excitations of Near Field Ground Motions [J].Shock and Vibration,2012,19(1):505-513.
- [10] Vassiliou M F,Tsiavos F,Stojadinovic B.Dynamics of Inelastic Base-isolated Structures Subjected to Analytical Pulse Ground Motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2013,42(14): 2043-2060.
- [11] 杨迪雄,赵岩.近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对隔震建筑结构抗震性能的影响[J].地震学报,2010,32(5):579-587.
YANG Di-xiong,ZHAO Yan.Effects of Rupture Forward Directivity and Fling Step of Near-fault Ground Motions on Seismic Performance of Base-isolated Building Structure[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(5): 579-587. (in Chinese)
- [12] 叶昆,李黎.LRB基础隔震结构在近断层脉冲型地震作用下的动力响应研究[J].工程抗震与加固改造,2009,31(2):32-42.
YE Kun,LI Li.Study on the Dynamic Response of LRB Base-isolated Structure under Near-fault Pulse-like Ground Motions[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009, 31(2): 32-42. (in Chinese)
- [13] 韩淼,段燕玲,孙欢.近断层地震动特征参数对基础隔震结构地震响应的影响分析[J].土木工程学报,2013,46(6):8-13.
HAN Miao, DUAN Yan-ling, SUN Huan. Influence of Characteristics Parameters of Near-fault Ground Motions on the Seismic Responses of Base-isolated Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(6): 8-13. (in Chinese)
- [14] 杜永峰,徐天妮,王亚楠,等.近断层地震动作用下设计速度反应用谱研究[J].地震工程学报,2014, 36(4):997-1002.
DU Yong-feng, XU Tian-ni, WANG Ya-nan, et al. Analysis of Designed Velocity Response Spectra Subjected to Near-fault Ground Motion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 997-1002. (in Chinese)
- [15] 李慧,王亚楠,杜永峰.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[J].地震工程学报,2013, 35(2):208-212.
LI Hui, WANG Ya-nan, DU Yong-feng. An Effectiveness Analysis on Hybrid Control System of Tuned Mass Damper-base Isolation under Near-fault Pulse-like Ground Motion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2): 208-212. (in Chinese)
- [16] 田玉基,杨庆山,卢明奇.近断层脉冲型地震动的模拟方法 [J].地震学报,2007,29(1):77-84.
TIAN Yu-ji, YANG Qing-shan, LU Ming-qi. Simulation Method of Near-fault Pulse-type Ground Motion [J]. Acta Seismologica Sinica, 2007, 29(1): 77-84. (in Chinese)
- [17] 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.