

层间滑移隔震结构地震作用有限元分析^①

张海龙¹, 展 猛², 王社良^{1,2}

(1. 西京学院土木工程学院, 陕西 西安 710123;

2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:将二硫化钼作为摩擦材料设计出一种带限位器的滑移隔震支座。根据多层框架结构变形的特点,给出适用于滑移框架隔震结构的计算模型,推导出层间滑移隔震结构的运动方程。运用 SAP2000 有限元软件建立一层间滑移框架隔震结构的有限元模型,对比分析 El Centro 地震波下摩擦系数和隔震层位置不同时隔震结构的地震反应。结果表明,上部结构的动力反应随摩擦系数的增加而不断增大,滑移隔震结构的减震效果逐渐减弱,但隔震层的滑移量却在不断减小;摩擦系数的选取应综合考虑减震效果和隔震层滑移量两个因素。随着隔震层的增高,结构的加速度反应和层间位移反应整体上呈增大趋势,隔震效果不断减弱,且隔震层的加速度值下部层比上部层要大得多,一层隔震和三层隔震时的变形主要集中于隔震层,而五层隔震时结构层间位移并未出现突变,说明隔震层设置在较高位置处对结构体系的影响较小。

关键词:二硫化钼; SAP2000; 框架结构; 层间滑移; 摩擦系数

中图分类号: TU352.1⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)04-0558-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.04.0558

Finite Element Analysis of the Seismic Response of an Interlayer Sliding Isolation Structure

ZHANG Hai-long¹, ZHAN Meng², WANG She-liang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Xijing University, Xian 710123, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering, Xian University of Architecture and Technology, Xian 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In this paper, using molybdenum disulfide as the friction material, a sliding isolation bearing with a limit stop is designed according to the deformation characteristics of multilayer frame structures, a calculation model for a sliding frame structure is given and an equation of motion for an interlayer sliding base-isolated structure is established. Using SAP2000 software, a finite element model of an interlayer sliding frame isolation structure is established and the seismic response of the structure compared and analyzed under different friction coefficients and isolation layer positions using the EL Centro seismic wave. The results show that the dynamic response of the upper structure increases with an increasing friction coefficient, the damping effect of the structure gradually weakens, and the isolation layer slippage constantly decreases. Therefore, selection of the friction coefficient should consider the damping effect and isolation layer slippage. In a higher isolation layer, the acceleration and interlayer displacement responses show an

① 收稿日期: 2016-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(51178388); 陕西省教育厅专项(14JK1420); 陕西省教育厅科研项目(15JK2171)

作者简介: 张海龙(1982—), 男, 陕西宝鸡人, 讲师, 主要从事结构抗震、隔震减震等方面的研究。

通信作者: 展 猛。E-mail: zhanyi313@163.com。

increasing trend and weakened isolation effect; the acceleration value of the lower part of the isolation layer is larger than that of the upper part. The deformation of first and third layer isolation is mainly focused on the isolation layer, but the interlayer displacement of fifth layer isolation does not appear altered. It indicates that the higher isolation layer has less effect on the structure system.

Key words: molybdenum disulfide; SAP2000; frame structure; interlayer sliding; friction coefficient

0 引言

基础滑移隔震是在建筑物上部结构和基础之间设置一个滑移面,将上部结构看成一个刚体,地震时允许建筑物相对于基础做整体平动,通过摩擦滑移来增加结构的自振周期,削弱地震能量向上部结构的传递,同时消耗吸收部分能量,从而实现了隔离地震的目的。由于该技术具有简单易行、造价低廉,不会出现共振等优点,国内外学者已对其减震机理和分析方法进行了大量研究。夏修身^[1]基于铁路连续梁拱组合体系桥梁提出了摩擦摆支座减、隔震设计的原则与方法,分析其减震效果。Makris 等^[2]研究不同摩擦系数及阻尼力的摩擦隔震系统,提出了较低的摩擦系数和黏滞阻尼力组合使用更为有利。樊剑等^[3]提出连续型指数摩擦力模型,采用 poincare 映射法分析滑移隔震结构在地面谐运动下的周期响应,并采用高精度时程积分法对滑移隔震结构的地震响应进行计算分析,绘制了上部结构动力系数反应谱和基底最大滑移量反应谱。毛利军等^[4]根据振型分解在不同地震波类型、地震波幅值、结构层数、上部结构固有周期、滑移摩擦系数和模型分析参数质量比影响因素下广义双自由度模型对多层滑移隔震结构最大滑移位移的计算精度和适应性。张延年等^[5]对双向耦合地震作用下滑移隔震结构模型进行理论研究,建立了相应的动力分析模型并得出其运动微分方程来进行地震反应分析。李慧等^[6]运用 SAP2000 分别模拟一幢 8 层带裙房钢筋混凝土框架层间隔震结构、基础隔震结构和抗震结构,分析并对比三种结构在近场地震作用下的动力响应特征。

可以看出,上述研究主要集中在层数较低的砖房结构的基础隔震,对于多层框架结构的层间隔震研究还很少。本文将二硫化钼作为摩擦材料设计出一种带限位器的滑移隔震支座,采用 SAP2000 软件对一多层的框架结构工程进行不同摩擦系数和不同隔震层位置的地震反应模拟计算,以分析摩擦系数和隔震层位置对摩擦滑移隔震结构减震效果的影响。

1 滑移隔震支座

充分利用二硫化钼固体润滑剂抗高压、耐高温、低摩擦和速度适应范围宽等优点^[7-8],将其作为滑移摩擦材料设计出一种新型滑移隔震装置,如图 1 所示。上下钢垫板分别通过预埋螺栓与混凝土结构连接。在下摩擦板中加入叠层橡胶垫,使隔震层各支座之间受力均匀,防止振动工程中可能引起的结构扭转,橡胶垫的数量可根据上部结构的重量来确定;小盒防止了下摩擦板中的叠层橡胶与钢板之间受拉破裂;预埋导向板上留有边长为 $2a$ 的正方形孔槽,以避免 X 向导向板在 Y 向地震中受扭破坏;圆锥钢棒限位器底端直径为 D ,高为 H ,沿着导向板滑移,自由滑移量为 a ,数量由上部结构的刚度来确定。

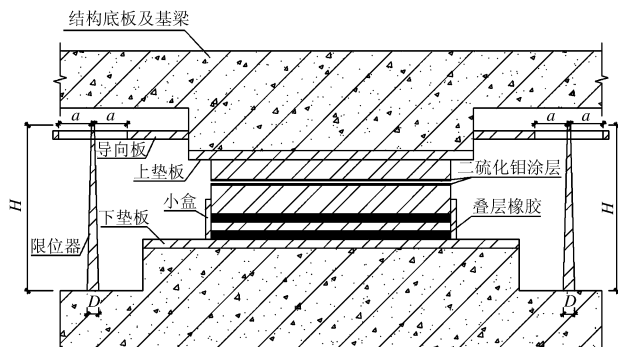


图 1 滑移隔震装置的构造图

Fig.1 Diagram of the sliding isolation structure

2 层间滑移隔震结构动力分析模型

摩擦滑移隔震结构的各层层间剪力和层间位移一般都比较小,因此上部结构的变形可以认为处在弹性范围内,这样结构就可以简化为层间剪切模型进行计算。该模型中结构各层的质量以质点的形式集中于楼盖处,竖向受力构件可以简化成一竖杆,其刚度为楼层的等效剪切刚度。由于滑移隔震结构体系的滑移层支撑净高一般较小,因此不会产生较为明显的竖向变形,故多层框架隔震体系可以简化为剪切型多质点平动体系模型进行动力分析^[9]。层间

滑移隔震结构的计算模型如图 2 所示。

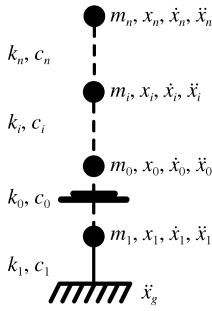


图 2 层间滑移隔震结构计算模型
Fig.2 Calculation model of the interlayer sliding isolation structure

考虑限位器的作用,则层间滑移隔震结构滑动时的运动方程为^[10]:

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

式中: $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为结构体系的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{\mathbf{X}\}$ 、 $\{\dot{\mathbf{X}}\}$ 、 $\{\ddot{\mathbf{X}}\}$ 分别为结构体系相对于基础顶面的水平位移向量、速度向量、加速度向量。

其中:

$$[C] = \begin{pmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & & & & \\ -c_2 & c_2 + c_2 & -c_3 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & -c_i & c_i + c_0 & 0 & \\ & & & 0 & c_0 + c_{i+1} & -c_{i+1} \\ & & & & \ddots & \ddots \\ & & & & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ & & & & & -c_n & c_n \end{pmatrix};$$
$$[K] = \begin{pmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & & & & \\ -k_2 & k_2 + k_2 & -k_3 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & -k_i & k_i + k_0 & 0 & \\ & & & 0 & k_0 + k_{i+1} & -k_{i+1} \\ & & & & \ddots & \ddots \\ & & & & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ & & & & & -k_n & k_n \end{pmatrix};$$

式中: x_0 、 $\dot{x}_0$ 、 $\ddot{x}_0$ 分别为隔震层相对于地面的位移、速度、加速度; m_0 为隔震层质量; x_i 、 $\dot{x}_i$ 、 $\ddot{x}_i$ ($i=1,2,\dots,n$) 为结构体系第 i 层相对于地面的位移、速度、加速度; c_i ($i=1,2,\dots,n$) 为结构体系第 i 层的层间阻尼; k_i ($i=1,2,\dots,n$) 为结构体系第 i 层的层间刚度; m_i ($i=1,2,\dots,n$) 为结构体系第 i 层的集中

$$\{\mathbf{X}\} = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_i \\ x_0 \\ x_{i+1} \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}; \{\dot{\mathbf{X}}\} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_i \\ \dot{x}_0 \\ \dot{x}_{i+1} \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{pmatrix}; \{\ddot{\mathbf{X}}\} = \begin{pmatrix} \ddot{x}_1 \\ \vdots \\ \ddot{x}_i \\ \ddot{x}_0 \\ \ddot{x}_{i+1} \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{pmatrix}$$
$$\{\mathbf{x}_g(t)\} = \begin{pmatrix} \ddot{x}_g(t) \\ \vdots \\ \ddot{x}_g(t) \\ \ddot{x}_g(t) \\ \vdots \\ \ddot{x}_g(t) \end{pmatrix}; \{\mathbf{F}\} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ f_d \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}; \{\mathbf{P}\} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ f_u \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$
$$[M] = \begin{pmatrix} m_1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & m_i & & & \\ & & & m_0 & & \\ & & & & m_{i+1} & \\ & & & & & \ddots \\ & & & & & & m_n \end{pmatrix};$$

质量; f_u 为限位复位装置对上部结构的恢复力, f_d 为摩擦滑移支座对上部结构的摩擦力。

3 多层框架结构隔震有限元分析

3.1 结构模型简介

以某框架结构科研办公楼为研究对象。该建筑

为地下 1 层,地上 6 层,层高分别为:地下室 6.25 m,第 1 层 3.9 m,标准层 3.6 m,顶层 4.5 m;其中沿 X 方向为 5 跨,轴间距为 8.4 m,沿 Y 方向为 3 跨,边跨轴间距为 7.2 m,中间跨轴间距为 2.7 m。结构模型平面布置示意如图 3 所示。为提高该建筑结构的抗震安全性,对其进行摩擦滑移隔震设计。其中隔震装置采用分离式摩擦滑移隔震系统,由滑移隔震支座和限位消能装置组成,在水平地震作用下隔震支座通过滑动摩擦力来控制上部结构的地震作用效应,限位效能装置利用其弹塑性变形来防止产生过大的滑移量。

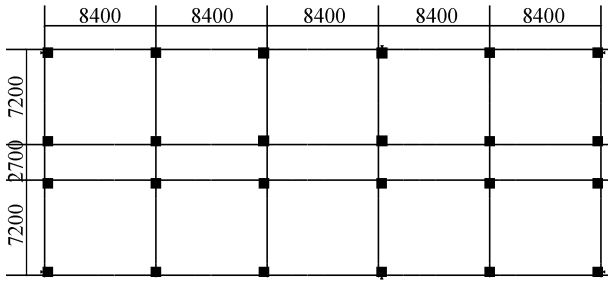


图 3 框架结构模型平面布置示意图(单位:mm)
Fig.3 Layout plan of the frame structure model (Unit:mm)

为了方便限位器的安装,同时考虑到复位,可将限位器与滑移层分离,在柱下安装滑移隔震支座处增设限位复位平台,其安装示意图 4。

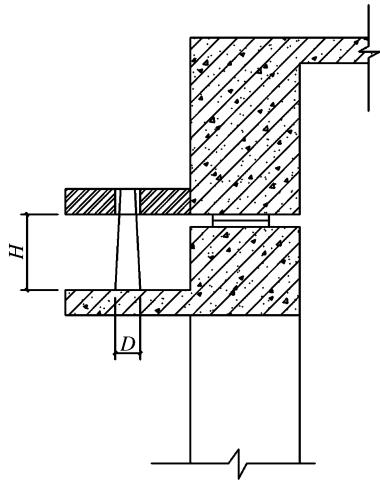


图 4 滑移支座安装平台示意图
Fig.4 Diagram of sliding bearing platform

3.2 有限元模型的建立

抗震结构和隔震结构以及结构构件模拟分析时均按照Ⅷ度设防进行设计。混凝土强度等级均采用 C35;钢筋强度框架柱、梁、板为 HRB400,箍筋为 HPB300。在 SAP2000 中梁柱的模拟采用其自身提

供的框架单元,结构中面单元的模拟采用 shell 单元。梁柱配筋采取软件自动配筋。滑移隔震装置采用 Friction Isolator 摩擦隔震单元来模拟,其中限位消能装置的模拟选用多段线性塑性连接单元中的随动硬化模型。

在进行减震效果分析时,分别建立抗震模型和滑移隔震模型进行对比分析。抗震模型为上部结构底部固结的分析模型;滑移隔震模型为在建筑物本层柱顶与上层底板之间加设摩擦隔震单元的分析模型,摩擦隔震单元下节点与本层柱顶连接,上节点与本层顶梁连接,同时在本层柱顶所在平面加设连系梁以减少其侧移。滑移隔震结构的有限元分析模型如图 5 所示。

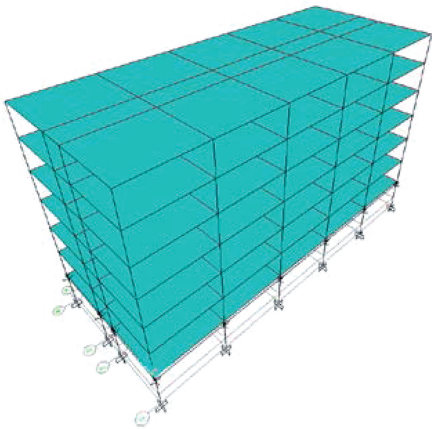


图 5 滑移隔震结构有限元模型
Fig.5 Finite element model of the sliding isolation structure

3.3 工况分析

选用 El Centro 波来分析摩擦滑移隔震结构的减震效果。加速度峰值调幅为Ⅷ度罕遇 400 gal,沿 X 向单向加载,间隔 0.02 s,持时 30 s,采用非线性直接积分法对隔震计算模型和抗震计算模型进行地震响应对比分析。将隔震装置布置在地下室顶板,取 0.04、0.06、0.08 及 0.1 为摩擦系数来分析其对隔震结构的影响。摩擦系数取 0.05,隔震层位置分别布置在第 1、3 及 5 层来分析隔震层位置对隔震结构的影响。

3.4 模拟结果与分析

图 6 给出了不同摩擦系数下模型结构的加速度、层间位移和层间剪力反应对比图。可以看出,随着摩擦系数的增大,上部结构的加速度反应、层间位移反应和层间剪力反应都逐渐增大,摩擦滑移隔震结构的减震效果逐渐减弱,但隔震层的滑移量却在不断减小,摩擦系数 0.4 时为 68.65 mm,1.0 时为

34.57 mm。这说明摩擦系数越小,滑移隔震体系的隔震减震效果越好,但隔震层的滑移位移则越大,因

此实际工程中摩擦系数的选取应综合考虑减震效果和隔震层滑移量两个因素。

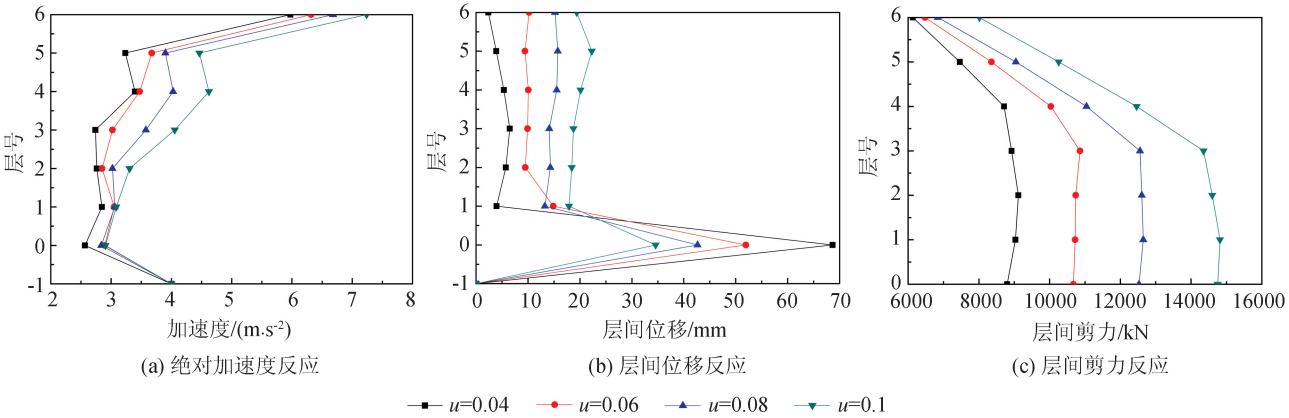


图 6 不同摩擦系数时隔震结构的地震反应

Fig.6 Seismic response of isolation structure under different friction coefficients

图 7 给出了隔震层位置不同时结构的绝对加速度反应和层间位移反应。可以看出,随着隔震层的增高加速度反应整体呈增大趋势,隔震效果不断减弱,且隔震层下部层的加速度值比上部层要大得多。同时可以看出,当三层隔震时,结构三层及以上各层的加速度反应小于一层隔震,表现出较好的减震效

果。从图中还可以看出,层间位移反应总体上随着隔震层位置的增高而逐渐增大,一层隔震和三层隔震时相应的变形主要集中于隔震层,一层隔震时的隔震层位移大于三层隔震时,但其余层的层间位移三层隔震大于一层隔震;而五层隔震时结构的变形并未集中在隔震层,且层间位移相对较大。这主要

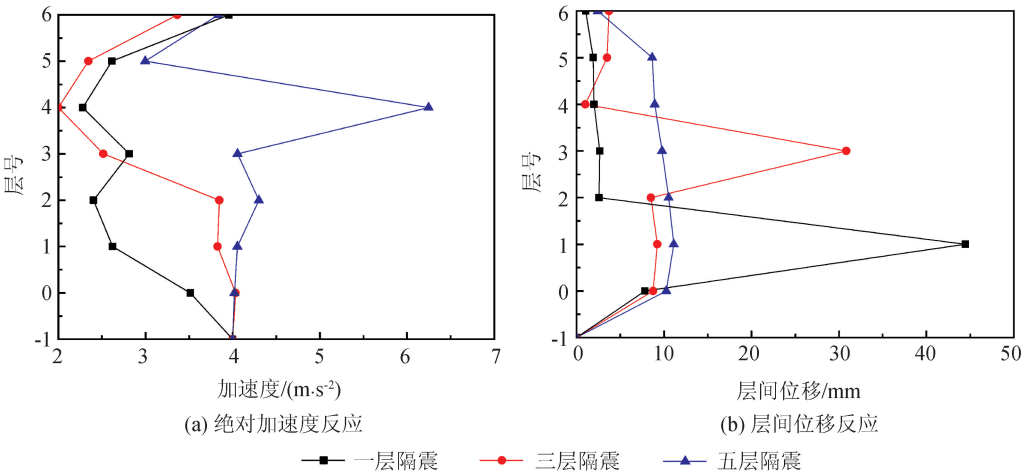


图 7 不同隔震层位置时隔震结构的地震反应

Fig.7 Seismic response of isolation structure with isolation layer in different position

是因为层间剪切体系的层间位移沿高度增加而不断减小,较高层的层间位移较小,隔震层设置在较高层对结构的影响较小,其隔震效果也越差。

4 结论

以二硫化钼作为摩擦材料设计出一种带限位器的滑移隔震支座。运用 SAP2000 有限元软件,建立一多层摩擦滑移框架结构的有限元模型,并对不同

摩擦系数和不同隔震层位置时的动力反应进行分析,研究摩擦系数和隔震层位置对摩擦滑移隔震结构减震效果的影响,主要结论如下:

(1) 上部结构的动力反应随摩擦系数的增加而不断增大,滑移隔震结构的减震效果逐渐减弱,但隔震层的滑移量却在不断减小,摩擦系数为 0.4 时其滑移量为 68.65 mm,1.0 时降低为 34.57 mm。这表明摩擦系数越小滑移隔震体系的隔震减震效果越

好,但隔震层的滑移位移会越大,因此实际工程中摩擦系数的选取应综合考虑减震效果和隔震层滑移量两个因素。

(2) 随着隔震层的增高,滑移隔震结构的加速度反应整体上呈增大趋势,隔震效果不断减弱,且隔震层下部层的加速度值比上部层要大得多。此外,当三层隔震时结构三层及以上各层的加速度反应小于一层隔震,表现出较好的减震效果。

(3) 层间位移反应总体上随着隔震层位置的增高而逐渐增大,一层隔震和三层隔震时相应的变形主要集中于隔震层,一层隔震时的隔震层位移大于三层隔震时,但其余层的层间位移三层隔震大于一层隔震;而五层隔震时,由于层间剪切型结构体系较高层的层间位移较小,隔震层设置在较高层对结构的影响较小,此时结构的变形并未集中在隔震层,且层间位移相对较大。

参考文献(References)

- [1] 夏修身.铁路连续梁拱组合桥基于摩擦摆支座的减隔震研究[J].西北地震学报,2012,34(4):350-354.
XIA Xiu-shen, Seismic Isolation of Combined System of Continuous Girder-arch Railway Bridge Using Friction Pendulum Bearing[J].Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(4): 350-354. (in Chinese)
- [2] Makris N, Chang S P. Effect of Viscous, Viscoplastic and Friction Damping on the Response of Seismic Isolated Structures[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29(6): 85-107. (in Chinese)
- [3] 樊剑, 唐家祥. 滑移隔震结构的动力特性及地震反应[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 11-16.
FAN Jian, TANG Jia-xiang. Structure Dynamic Characteristics and Seismic Response of Sliding Base-isolated Structure[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 11-16. (in Chinese)
- [4] 毛利军, 李爱群. 多层滑移隔震建筑结构的简化模型及其分析

精度[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(2): 117-123.

- MAO Li-jun, LI Ai-qun. The Simplified Models and Their Precision for Analysis of Multi-story Sliding Isolated Structures[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(2): 117-123. (in Chinese)
- [5] 张延年, 李宏男. 双向耦合地震作用下滑移隔震结构振动控制及其优化研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(1): 141-146.
ZHANG Yan-nian, LI Hong-nan. Seismic Responses of Sliding Isolated Structure under Bidirectional Coupling Earthquake and Its Optimization[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(1): 141-146. (in Chinese)
- [6] 李慧, 包超, 杜永峰. 近场地震作用下不规则层间隔震结构的动力响应分析[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 51-55.
LI Hui, BAO Chao, DU Yong-feng. Dynamic Response Analysis of Irregular Story Isolation Structures under Near-field Earthquake Conditions[J]. China Earthquake Engineer Journal, 2013, 35(1): 51-55. (in Chinese)
- [7] 张文钺, 姚爻. 二硫化钼制备与应用研究进展[J]. 润滑油, 2006, 21(4): 19-25.
ZHANG Wen-zheng, YAO Shu. An Advance in the Research of Preparation and Application of Molybdenum Disulfide Lubricant[J]. Lubricating Oil, 2006, 21(4): 19-25. (in Chinese)
- [8] 王国栋, 蒋丽娟, 李来平, 等. 二硫化钼润滑剂应用研究进展[J]. 中国钼业, 2013, 37(5): 10-14.
WANG Guo-dong, JIANG Li-juan, LI Lai-ping, et al. Advances in Research on Molybdenum Disulfide Additive[J]. China Molybdenum Industry, 2013, 37(5): 10-14. (in Chinese)
- [9] 苏经宇, 曾德民, 田杰. 隔震建筑概论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
SU Jing-yu, ZENG De-min, TIAN Jie. Introduction to Isolation Structures[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [10] 杨佳玲. 新型滑移隔震支座性能试验研究及隔震结构地震反应分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012.
YANG Jia-ling. Experimental Investigation on New Sliding Isolation Device and Seismic Response Analysis of Isolated Structure[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2012. (in Chinese)