

程志远,胡紫东,李黎,等.考虑温度影响的 LRB 隔震建筑地震响应分析[J].地震工程学报,2020,42(1):38-43.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.038

CHENG Zhiyuan, HU Zidong, LI Li, et al. Seismic Response Analysis of LRB Isolation Buildings Considering the Effects of Temperature[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(1): 38-43. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.038

考虑温度影响的 LRB 隔震建筑地震响应分析

程志远^{1,2}, 胡紫东², 李黎², 亓丽芳¹

(1. 湖北第二师范学院建筑与材料工程学院, 湖北 武汉 430205;

2. 华中科技大学控制结构湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为研究温度对铅芯橡胶支座(LRB)性能的影响,进行支座拟静力试验。试验表明,在不同温度环境中试件的滞回曲线明显不同,支座的刚度和屈服剪力均随温度的升高而降低;低温时,支座的力学特性变化较大,而当温度大于 20 ℃ 时,支座的力学特性趋于稳定。以某五层基础隔震建筑为例,编写基础隔震结构非线性时程分析程序 NBIS,计算该隔震建筑在考虑温度影响后的地震响应。结果表明,在多遇地震作用下支座恢复力随温度的升高而降低,与罕遇地震下的变化趋势相反;考虑 LRB 温度影响后,该基础隔震结构的减震系数随环境温度的降低而增大,支座的最大位移随温度升高而增大。

关键词: 铅芯橡胶支座; 温度效应; 滞回曲线; 隔震建筑; 地震响应

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)01-0038-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.038

Seismic Response Analysis of LRB Isolation Buildings Considering the Effects of Temperature

CHENG Zhiyuan^{1,2}, HU Zidong², LI Li², QI Lifang¹

(1. School of Architecture and Material Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430205, Hubei, China;

2. Hubei Key Laboratory of Control Structure, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: A pseudo-static experiment was carried out to study the effect of temperature on the performance of a lead rubber bearing (LRB). Results showed that the hysteretic curves of the specimen was clearly different under different temperatures, and the stiffness and yield shear force of the bearing decreased with increasing temperature. At low temperatures, mechanical properties of the bearing varied greatly, but tended to be stable when the temperature was $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Taking a five-story base isolation building as an example, a nonlinear time history analysis program NBIS for base isolated structures was compiled to calculate the seismic response of the building after considering the effect of temperature. Results showed that the restoring force of the bearing decreased with increasing temperature under frequent earthquakes, which was contrary to the chan-

收稿日期: 2018-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51808201);湖北省优秀中青年科技创新团队项目(T201620);湖北第二师范学院科研启动经费资助(No.8)

第一作者简介: 程志远(1985-),男,湖北武汉人,博士,讲师,研究方向为结构振动控制与防灾减灾。

E-mail: chengzhiyuan2008@163.com。

ging trend under rare earthquakes. The seismic decrease coefficient of base-isolated structure increased with decreasing ambient temperature considering the effects of temperature, and maximum displacement of the bearing increased with increasing temperature.

Keywords: lead rubber bearing (LRB); temperature effect; hysteretic curve; isolated building; seismic response

0 引言

铅芯橡胶支座(Lead Rubber Bearing,LRB)作为较成熟的隔震技术之一,不仅能有效降低上部结构地震响应,满足抗震设计要求,还具有良好的适用性、耐久性和经济性,因此被广泛应用于各种建筑结构^[1-3]。现阶段使用我国规范^[4]进行 LRB 隔震结构设计时,支座的力学性能参数一般都使用固定值。然而支座的温度相关性试验表明^[5-7],在不同温度环境下支座的力学性能存在较大差异。我国地域辽阔,地震区域分布广泛,各地气候条件等差异较大,在不同的温度环境中支座的力学性能各不相同,从而导致隔震结构在地震中的响应以及隔震效果与设计时存在较大偏差。如果不考虑温度对 LRB 性能的影响而统一采用固定的性能参数值,将不能真实预测隔震结构在地震中的响应^[8-9]。目前,在温度对 LRB 性能的影响以及对整个隔震建筑地震响应的影响方面尚未取得系统研究成果。

基于此,本文首先进行不同温度条件下 LRB 的拟静力试验,得到支座力学参数随温度的变化规律;再通过参数识别技术,拟合出支座参数与环境温度的相关性曲线;最后编写基础隔震结构的非线性时

程分析程序,并根据计算结果对比讨论支座温度对隔震建筑地震响应的影响。

1 LRB 温度相关性试验

1.1 试验设备

LRB 温度相关性试验在华中科技大学工程结构检测中心完成,使用的主要试验设备包括:CS2500/200 压剪试验机、CDJ 型温变控制箱以及 GZY400 型隔震支座。

CS2500/200 压剪试验系统如图 1 所示,主要由加载系统和数据采集系统组成。其水平加载能力 2 000 kN,位移行程±600 mm;竖向加载能力 25 000 kN,位移行程±200 mm。数据采集系统主要控制水平向和竖向加载,采集力和位移数据并根据试验数据绘制滞回曲线。

CDJ400 型温变控制箱可以控制支座的温度在-60℃~130℃间变化,控制精度在 0.5℃以内。其内部尺寸为 600 mm(深)×800 mm(宽)×850 mm(高)。温变控制箱采用全封闭涡旋压缩机,温控性能稳定,具有快速自整定、数显等功能。

GZY400 型铅芯橡胶支座由国内某厂家制作生产,其物理力学参数的理论值列于表 1。

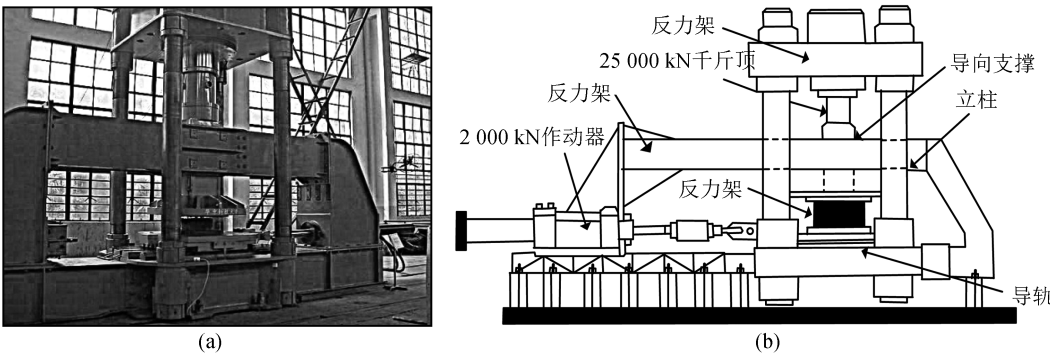


图 1 CS2500/200 型压剪试验机
Fig.1 CS2500/200 compression shear test machine

表 1 GZY400 型隔震支座的力学参数

Table 1 Mechanical parameters of GZY400 isolation bearing				
屈前刚度 /(kN·mm ⁻¹)	屈后刚度 /(kN·mm ⁻¹)	屈服剪力 /kN	γ=100%等效刚度 /(kN·mm ⁻¹)	γ=250%等效刚度 /(kN·mm ⁻¹)
10.8	1.02	31.54	1.14	0.92

1.2 试验过程

温度相关性试验的主要目的是测定 LRB 在不同温度时的滞回性能。试验选择的温度环境分别为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，试验过程如下：

(1) 把支座放入温变控制箱，调整箱内温度到试验温度并保持恒定，持续 24 h 以上；

(2) 将支座快速搬运至压剪试验机并安装固定，为保证温度基本恒定，搬运过程需用绝缘棉垫包裹支座；

(3) 对隔震支座进行竖向加载，控制加载压力为 12 MPa，然后进行水平位移 $\gamma=100\%$ 的滞回试验，并绘制滞回曲线，试验的详细过程和要求参见我国规范^[10-11]；

(4) 滞回试验完成后，将支座重新放入温变控制箱，并调节温度至下次试验所需温度，重复试验步骤(2)~(4)。

1.3 试验结果

通过温度相关性试验，得到 GZY400 型 LRB 在不同温度下的滞回曲线(图 2)，参照温度为常温 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。受篇幅限制，这里仅列出试件在部分温度环境中的滞回曲线。由图 2 可以看出，LRB 的滞回曲线受温度的影响较为明显，其力学性能参数也随温度变化各不相同。在高温环境中，支座的滞回性能与常温相比虽然有所不同，但差别并不大。在低温环境中支座的滞回曲线与常温相比有明显差异，即滞回面积随温度的降低而增加，并且滞回曲线有上翘趋势。

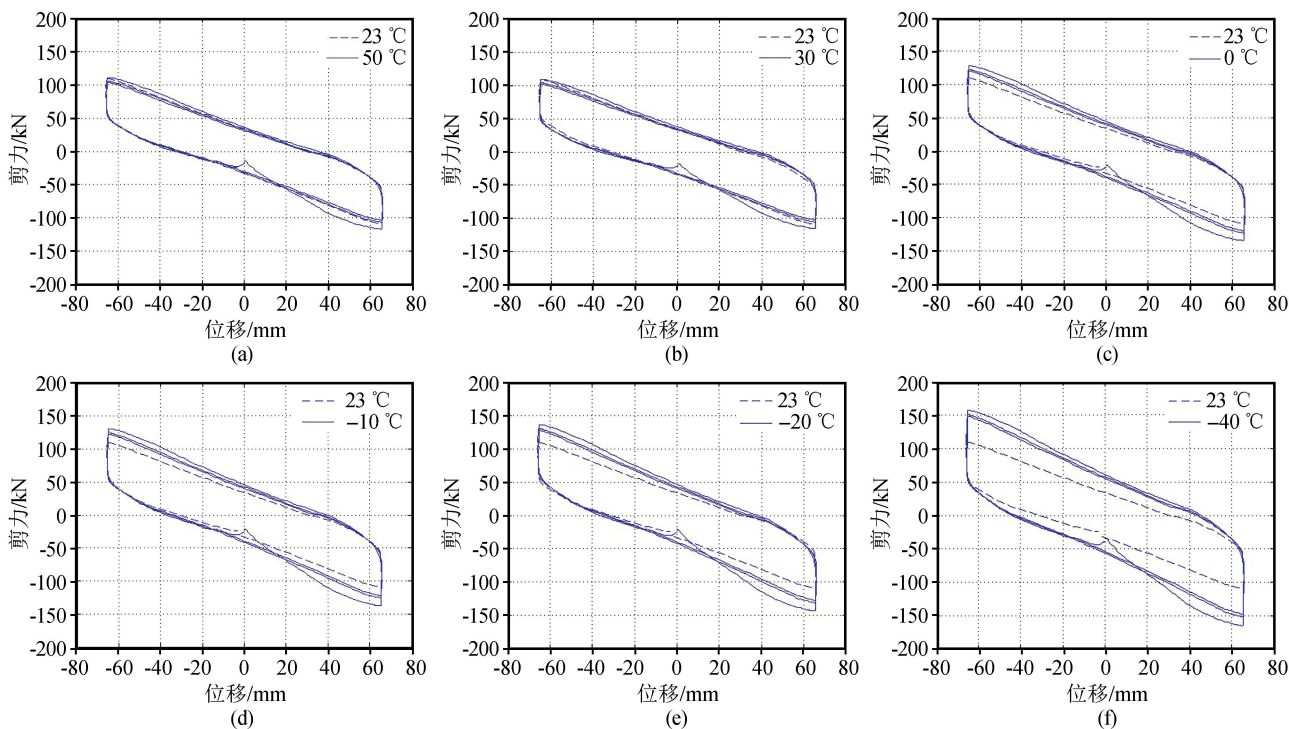


图 2 GZY400 在不同温度环境下的滞回曲线

Fig.2 Hysteretic curves of GZY400 under different temperatures

1.4 支座参数识别及分析

参数识别^[12-13]是根据试验数据和建立的模型来确定一组参数值，使得由模型计算得到的数值结果能最好地拟合测试数据，常用于结构健康监测及试验。最小二乘法是目前应用最为广泛的参数识别法，其准则为通过最小化误差的平方和寻找数据的最佳函数匹配^[14]。因此本试验运用最小二乘法对试验结果进行隔震支座的参数识别，定量得到不同温度作用下支座的屈前刚度、屈后刚度和屈服剪力，并采用回归分析拟合了支座参数随竖向荷载的变化

曲线。为减少误差，支座参数采用多个 GZY400 支座的平均值，结果如图 3 所示。从图中可以看出 LRB 的屈前刚度、屈后刚度和屈服剪力都随温度的升高而减小。当环境温度大于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，LRB 的力学参数变化不大并趋于恒定；当隔震支座处于较低温时，其力学性能受温度的影响较大。

2 算例分析

以一采用 LRB 基础隔震形式的五层钢筋混凝土框架建筑为例进行分析。结构的基本计算参数为：

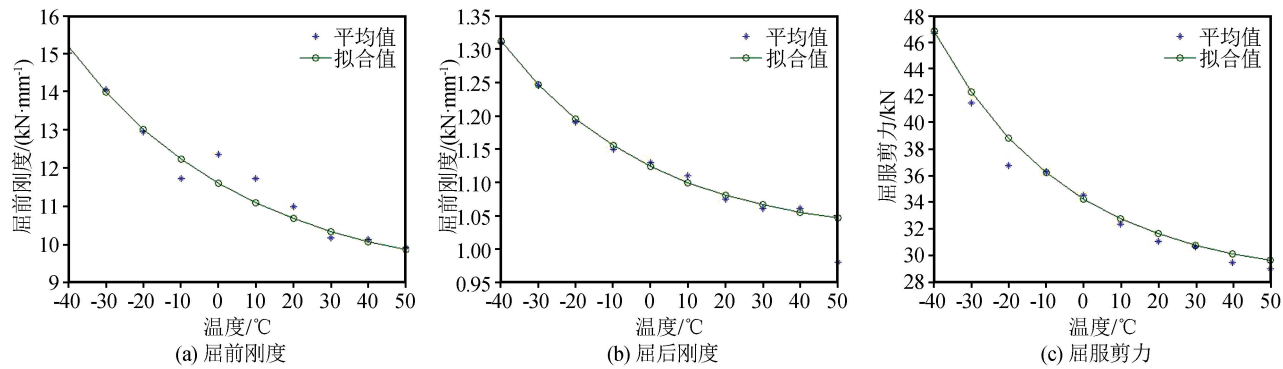


图 3 GZY400 在不同温度环境下的力学参数识别结果

Fig.3 Identification results of mechanical parameters of GZY400 under different temperatures

地上结构五层,层高 2.8 m,每层质量约为 4×10^5 kg,层间刚度约为 8.5×10^9 N/m,为简化计算,假定质量和刚度分布均匀,且不考虑偏心;隔震层层高 1.8 m,质量约为 4×10^5 kg,LRB 选用 GZY400 型,共 15 个。抗震设防烈度为Ⅷ度($0.2g$),Ⅱ类场地。根据初始设计计算,在不考虑温度对 LRB 性能的影响时,该栋建筑能满足降一度的隔震目标。本算例时程分析所选地震波^[15-16]为:El-Centro 波、Kobe 波和 Duzce 波;峰值加速度:多遇地震为 70 cm/s^2 ,罕遇地震为 400 cm/s^2 。为了分析温度对 LRB 隔震建筑地震响应的影响,采用 Matlab 语言编写了非线性时程分析程序 NBIS,橡胶铅芯支座选用 Bouc-Wen 模型^[17],并采用 Runge-Kutta 法^[18]进行求解。

图 4(a)、(b)分别为多遇地震和罕遇地震作用下 LRB 的最大恢复力随温度的变化规律。由图可知,在多遇地震作用下支座的最大恢复力随温度的升高而减小,与罕遇地震作用下的变化规律相反。

这是因为决定恢复力的主要因素包括支座的相对位移和刚度,多遇地震时支座相对位移较小,其恢复力主要由刚度控制,而由温度相关性试验结果可知支座的刚度随温度的增加而减小,因此恢复力随温度的变化规律与刚度一致。而遭遇罕遇地震作用时,隔震建筑的地震响应更加明显,支座位移相对增大,此时的恢复力主要由相对位移进行控制,随温度升高而增大。图 4(c)为考虑温度影响后支座的恢复力与常温环境下恢复力的误差变化规律。由图可知,各温度工况下,多遇地震下支座恢复力的误差均大于罕遇地震。多遇地震作用时,当环境温度小于 0°C 时,支座恢复力的计算误差均大于 5%;罕遇地震作用下,当环境温度小于 -30°C 时,支座恢复力的计算误差均大于 5%。因此考虑温度影响后,LRB 隔震结构支座恢复力的计算结果与常温环境有所差异,并且环境温度越低误差越大。

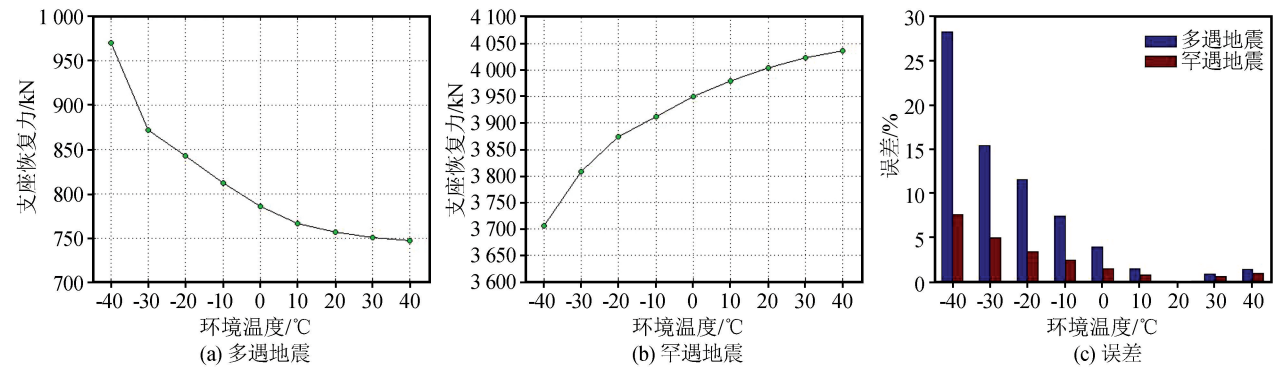


图 4 支座恢复力最大值随温度的变化规律

Fig.4 The variation rule of maximum restoring force with temperature

图 5 为减震系数随温度的变化规律。由图可知,随环境温度的升高减震系数总体上降低,即在正常使用的温度范围内温度越高隔震效果越好。对于本栋建筑而言,当环境温度在 0°C 以下时减震系数

值都在 50% 以上,这也就是说,该隔震建筑在 0°C 以下使用时并没有达到设计时降一度的隔震目标。因此在进行严寒地区隔震建筑设计时应充分考虑温度对 LRB 性能的影响。

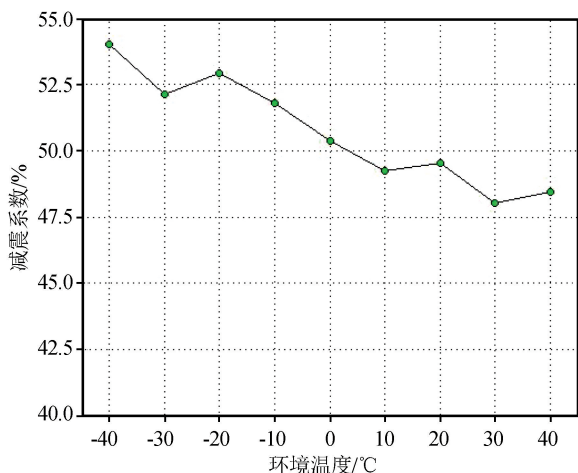


图 5 减震系数随温度的变化规律

Fig.5 The variation rule of seismic decrease coefficient with temperature

图 6 为罕遇地震作用下支座最大位移随温度的变化规律。由图可知,隔震支座的水平位移峰值随温度升高而增大。这是因为升温导致支座刚度退化,位移相应增加。本案例中 GZY400 型支座的位移限值为 220 mm,而图 6 显示,当环境温度较高(超过 23 °C)时支座的最大位移均超过了限值,不能满足设计要求。因此验算罕遇地震作用下炎热地区支座的最大位移时应充分考虑温度对 LRB 性能的影响。

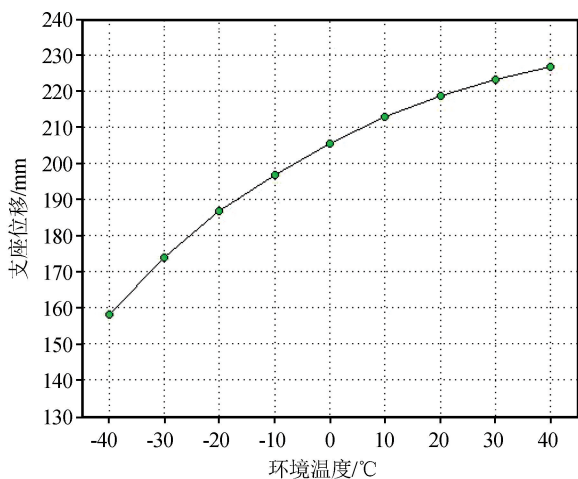


图 6 支座最大位移随温度的变化规律

Fig.6 The variation rule of maximum displacement of bearing with temperature

3 结论

传统的 LRB 在设计时没有考虑温度相关性对支座性能的影响,从而导致隔震结构的地震响应与实际情况不符。本文主要研究了温度对 LRB 隔震

建筑地震响应的影响,得出如下结论:

(1) LRB 在不同温度环境中的滞回性能不同。LRB 的刚度和屈服剪力都随温度的升高而减小,当环境温度大于 20 °C 时,其力学参数变化不大并逐渐趋于恒定。而支座处于较低温时,其力学性能受温度的影响较大。

(2) 在多遇地震作用下,隔震支座的最大恢复力随温度的升高而减小,与罕遇地震作用下的变化规律相反。考虑温度影响后,LRB 隔震支座恢复力的计算结果与常温环境有所差异,并且环境温度越低误差越大。

(3) 随环境温度的升高减震系数总体上降低,即在正常使用的温度范围内温度越高隔震效果越好。尤其是在进行严寒地区隔震建筑设计时应充分考虑温度对 LRB 性能的影响。

(4) 隔震支座的水平位移峰值随温度升高而增大,罕遇地震作用下验算炎热地区支座的最大位移时应充分考虑温度对 LRB 性能的影响。

参考文献(References)

- [1] 刘文光,庄学真,周福霖,等.中国铅芯夹层橡胶隔震支座各种相关性能及长期性能研究[J].地震工程与工程振动,2002,22(1):114-120.
LIU Wenguang, ZHUANG Xuezheng, ZHOU Fulin, et al. Dependence and Durability Properties of Chinese Lead Plug Rubber Bearings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(1): 114-120.
- [2] 刘文光,任玥,何文福,等.建筑 LRB 橡胶支座的老化和徐变性能研究[J].世界地震工程,2012,28(4):131-136.
LIU Wenguang, REN Yue, HE Wenfu, et al. Aging and Creep Properties of LRB Isolators Used in Building[J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(4): 131-136.
- [3] VEMURU V S M, NAGARAJAIAH S, MOSQUEDA G. Coupled Horizontal-vertical Stability of Bearings under Dynamic Loading[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45(6): 913-934.
- [4] GB50011-2010: 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011-2010: Code for Seismic Design of Buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [5] 刘文光,秦皇婷,何文福,等.极低温度下 LRB 力学性能及对高层结构地震响应的影响[J].振动与冲击,2012,31(13):85-90.
LIU Wenguang, QIN Huangting, HE Wenfu, et al. Mechanical Properties of LRB in Low Temperature State and Its Influence on Earthquake Response of High Buildings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(13): 85-90.

- [6] 秦川,刘文光,何文福,等.考虑铅芯温度效应的橡胶支座参数影响分析[J].振动与冲击,2017,36(10):182-189.
QIN Chuan, LIU Wenguang, HE Wenfu, et al. Comparative Analysis of Lead Heating Effects on Lead Rubber Bearing Behaviours[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(10): 182-189.
- [7] OZDEMIR G, DICLELI M. Effect of Lead Core Heating on the Seismic Performance of Bridges Isolated with LRB in Near-fault Zones[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(14): 1989-2007.
- [8] 胡紫东,李黎,聂肃非.考虑温度相关性的 LRB 隔震桥梁地震响应分析[J].振动与冲击,2011,30(9):40-45.
HU Zidong, LI Li, NIE Sufei. Seismic Response of Isolated Bridges Considering Temperature Effect[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(9): 40-45.
- [9] OZDEMIR G. Formulations for Equivalent Linearization of LRBs in Order to Incorporate Effect of Lead Core Heating[J]. Earthquake Spectra, 2014, 31(1): 317-337.
- [10] GB20688.1-2007:橡胶支座第 1 部分:隔震橡胶支座试验方法[S].北京:中国标准出版社,2007.
GB20688.1-2007: Rubber Bearings Part 1: Test Method for Isolated Rubber Bearings[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [11] GB20688.3-2006:橡胶支座第 3 部分:建筑隔震橡胶支座[S].北京:中国标准出版社,2006.
GB20688.3-2006. Rubber Bearings Part 3: Rubber Bearings for Building Isolation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [12] ZGHAL M, MEVEL L, DEL MORAL P. Modal Parameter Estimation Using Interacting Kalman Filter[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 47(1-2): 139-150.
- [13] LIU Y C, LOH C, NI Y Q. Stochastic Subspace Identification for Output-only Modal Analysis: Application to Super High-rise Tower under Abnormal Loading Condition[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(4): 477-498.
- [14] 唐旭清.数值计算方法[M].北京:科学出版社,2015.
TANG Xuqing. Numerical Calculation Method[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [15] 杨溥,李英民,赖明.结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J].土木工程学报,2000,33(6):33-37.
YANG Pu, LI Yingmin, LAI Ming. A New Method for Selecting Inputting Waves for Time-history Analysis[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(6): 33-37.
- [16] 王国新,鲁建飞.地震动输入的选取与结构响应研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2012,28(1):15-22.
WANG Guoxin, LU Jianfei. Strong Ground Motion Input and Structural Response[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2012, 28(1): 15-22.
- [17] 李鸿光,何旭,孟光. Bouc-Wen 滞回系统动力学特性的仿真研究[J].系统仿真学报,2004,16(9):2009-2011,2036.
LI Hongguang, HE Xu, MENG Guang. Numerical Simulation for Dynamic Characteristics of Bouc-Wen Hysteretic System[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(9): 2009-2011, 2036.
- [18] 吴志桥,高普云,任钧国. Runge-Kutta 方法求解结构动力学方程[J].系统仿真学报,2010,22(9):2085-2090.
WU Zhiqiao, GAO Puyun, REN Junguo. Runge-Kutta Methods for Time Integration in Structural Dynamics[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(9): 2085-2090.