

DOI:10.11918/202305083

考虑环境温度效应的隔震橡胶支座力学性能试验

庞辉^{1,2,3}, 姜涛^{1,2}, 戴君武^{1,2}, 杨永强^{1,2}, 柏文^{1,2}

(1. 地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局工程力学研究所), 哈尔滨 150080;

2. 地震灾害防治应急管理部重点实验室, 哈尔滨 150080; 3. 北华大学 土木与交通学院, 吉林 吉林 132013)

摘要: 为研究环境温度对隔震橡胶支座力学特性的影响, 利用高速压剪试验设备针对直径 700 mm 的隔震橡胶支座 (LRB700 以及 LNR700) 开展一系列不同温度 (-20、0、23 °C)、不同频率 (0.2、0.25、0.3 Hz) 以及不同剪应变 (50%、100%、250%) 的压剪试验。鉴于高速高压 (15 MPa 的竖向压应力) 试验设备本身会产生较大的惯性力以及摩擦力, 分别提供相应的修正方案以便准确获得支座的力学性能指标。结果表明: 随着加载圈数的增加, LRB700 内部铅芯的温度变化较为明显, 并呈现关于高度的对称性, 而 LNR700 内壁温度变化很小; LRB700 及 LNR700 的相关力学性能指标 (如水平屈服剪力、屈服后水平刚度以及水平等效刚度) 随环境温度的降低都表现出不同程度的上升趋势, 其中, LRB700 水平屈服剪力上升 15% ~ 32%, LRB700 屈服后水平刚度上升 7% ~ 16%, LRB700 与 LNR700 水平等效刚度分别上升 12% ~ 23%、5% ~ 16%。基于上述结果并结合相关规范针对 LRB700 以及 LNR700 提出考虑环境温度效应的力学性能调整系数。

关键词: 隔震橡胶支座; 考虑环境温度; 修正方案; 性能指标; 性能调整系数

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)06-0091-13

Experimental study on mechanical properties of rubber bearings considering the effects of ambient temperature

PANG Hui^{1,2,3}, JIANG Tao^{1,2}, DAI Junwu^{1,2}, YANG Yongqiang^{1,2}, BAI Wen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration (Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration), Harbin 150080, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin 150080, China; 3. School of Civil Engineering & Transportation, Beihua University, Jilin 132013, Jilin, China)

Abstract: To investigate the effect of ambient temperature on the mechanical properties of rubber bearings, high-speed compression shear apparatus is used to conduct a series of compression-shear tests at varying temperatures (-20, 0, 23 °C), frequencies (0.2, 0.25, 0.3 Hz), and shear strains (50%, 100%, 250%) on rubber bearings (LRB700 and LNR700). Given that the significant inertial and frictional forces generated by the high-speed and high-pressure (15 MPa vertical compressive stress), this paper firstly proposes correction methodologies for accurately determining the performance indexes of bearings under conditions of high-speed and high-pressure loading. Test results indicate that with an increasing number of loading circles, the temperature variation within the internal lead core of LRB700 is more pronounced and exhibits symmetry with respect to the height of the lead core, whereas the temperature variation on the inner wall of LNR700 is minimal. In addition, the primary mechanical indexes of LRB700 and LNR700 (such as characteristic strength, post-yield horizontal stiffness, and horizontal equivalent stiffness) exhibit varying degrees of an upward trend as ambient temperature decreases. Specifically, the characteristic strength of LRB700 increases by 15% to 32%, the post-yield stiffness of LRB700 increases by 7% to 16%, and the horizontal equivalent stiffness of LRB700 and LNR700 increases by 12% to 23% and 5% to 16%, respectively. Finally, this research concludes by proposing mechanical performance adjustment coefficients for LRB700 and LNR700 that account for the effect of ambient temperature based on the aforementioned results and in accordance with relevant standards.

Keywords: rubber bearings; ambient temperature; correction methodologies; performance index; adjustment coefficients

收稿日期: 2023-05-29; 录用日期: 2023-07-05; 网络首发日期: 2023-09-15

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20230914.1648.004>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(52208509); 黑龙江省自然科学基金(LH2022E121); 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2022C04); 国家自然科学基金(52078471); 内蒙古自治区地震局局长基金(2023MS10)

作者简介: 庞辉(1988—), 女, 博士研究生; 戴君武(1967—), 男, 研究员, 博士生导师

通信作者: 姜涛, m18686805613@163.com

现代隔震技术能够显著减小上部结构的地震反应,减轻地震对上部结构以及建筑设备、物品安全的影响^[1-2],是实现“韧性城乡”的有效手段。截至 2022 年 12 月,中国已建或在建的各类减、隔震建筑数量约占世界的一半,并主要以橡胶隔震技术为主。隔震建筑以其优异的结构抗震性能被大量地应用于地震多发地区的重要建(构)筑物^[3],然而,随着隔震技术的不断发展,橡胶支座隔震体系的应用环境日趋复杂,环境温度对隔震体系性能的影响逐渐成为工程界和学术界关注的重点。

众所周知,作为叠层橡胶隔震装置主要材料——橡胶与铅芯的力学特性与环境温度强烈相关,温度降低橡胶变硬,刚度提高但脆性增加。这一特性导致叠层橡胶隔震装置的实际力学特性将随环境温度的降低而非线性劣化。为此,国内外学者对隔震橡胶支座温度相关性作了相关研究。在试验研究方面,尹维祥^[4]和李慧等^[5]研究了 GZY300 在 $-50 \sim -20$ °C 低温环境下的力学性能,并给出了不同温度下支座的拟静力试验曲线,得出了铅芯橡胶支座(LRB)在低温环境下刚度与常温下刚度有较大偏差的结论。Ghasemi 等^[6]通过拟静力试验研究了无铅芯橡胶隔震支座的温度相关性。由世岐等^[7]通过拟静力试验对比分析了两个不同厂家橡胶支座的低温力学性能。Ahn 等^[8]基于试验数据,通过参数识别技术研究了支座温度相关性对隔震桥梁的影响。杜永峰等^[9]研究了橡胶隔震支座的低温性能及对动力可靠性的影响,指出在 -50 °C 的低温下,隔震结构的“小震”总失效概率是常温下隔震结构总失效概率的 2 倍。刘文光等^[10]对橡胶支座力学参数的温度性能进行研究,提出了支座屈服后水平刚度和水平屈服剪力的温度修正方程。庄学真等^[11-12]分别对直径 600、1 200 mm 橡胶支座进行温度相关性研究,结果表明,温度对支座竖向刚度、水平刚度和水平屈服剪力都有一定影响。依据试验结果,胡紫东^[13]拟合出了支座力学性能参数的回归曲线,并开展了不同温度下支座特性变化对隔震桥梁结构地震反应影响的深入分析。刘文光等^[14]根据 $-40 \sim 40$ °C 下支座性能试验结果,对高层隔震结构地震响应进行了比较分析,结果表明,支座温度性能对隔震结构地震响应影响较大,应在隔震设计时充分考虑。Zhang 等^[15]为了探究环境温度对橡胶隔震支座力学性能的影响,针对缩尺支座开展了 $-30 \sim 20$ °C 的一系列变温压剪试验,结果表明,隔震橡胶支座的水平等效刚度、水平屈服剪力以及屈服后水平刚度等力学性能随环境温度影响较大。

在理论研究方面,Kalpakidis 等^[16-17]根据能量守恒原理,提出 LRB 的耗能主要是将地震输入的能量转换为铅芯和橡胶的热能。Constantinou 等^[18]通过理论分析、数值模拟和试验研究,得到了 LRB 支座考虑老化和温度等条件影响下的力学特性变化规律,并提出了相应修正系数。这些修正参数被 AASHTO 隔震设计指导性规范^[19]所采纳。在此基础上,Kalpakidis 等^[20]提出了一种改进的双线性滞回模型,并开展了相应的动力响应分析。该模型的模拟结果与支座试验结果较为吻合,验证了上述理论及改进模型的准确性。Ozdemir 等^[21-24]在此基础上研究了多种场地条件下地震作用引起的支座铅芯温度变化对隔震桥梁地震响应的影响,比较了单向和双向地震耦合作用下支座铅芯温度变化差异及对结构响应的影响,提出了考虑铅芯温度变化的 LRB 支座等效线性化算法的参数修正公式。

众多学者对隔震支座在不同温度条件下的力学性能进行了研究,结果表明,温度对铅芯橡胶隔震支座力学性能有明显影响,特别是在低温条件下影响更为显著,但受限于试验方法和试验环境,针对隔震橡胶材料高、低温性能的研究仍不充分。鉴于隔震工程在中国北方、南方高烈度区的高速建设和“韧性城乡”建设对地震工程领域的技术需求,利用高速压剪试验设备针对直径 700 mm 的隔震橡胶支座(LRB700 以及 LNR700)开展了一系列不同温度($-20, 0, 23$ °C)、不同频率(0.2、0.25、0.3 Hz)以及不同剪应变(50%、100%、250%)的压剪试验,以研究环境温度对隔震橡胶支座力学特性的影响。针对高速高压(15 MPa 的竖向压应力)试验中设备本身产生的较大惯性力以及摩擦力,分别提供了相应的修正方案以便准确获得支座的性能指标。基于试验结果详细分析了隔震橡胶支座(LRB700 以及 LNR700)内部温度随加载圈数的变化规律,并总结了各力学性能指标的温度相关性。最后,以室温(23 °C)为基准结合相关规范,针对水平屈服剪力、屈服后水平刚度以及水平等效刚度提出了考虑环境温度影响的相关调整系数,以供设计人员参考。

1 试验

1.1 试样信息

本研究的隔震橡胶支座均为市场采购的典型通用型支座,其中包含 3 块天然橡胶支座(分别为 LNR700-1、LNR700-2、LNR700-3)以及 3 块铅芯橡胶支座(分别为 LRB700-1、LRB700-2、LRB700-3)。隔震橡胶支座的具体尺寸详见表 1。

表1 天然与铅芯橡胶支座试样尺寸

Tab.1 Dimensions of specimens

支座类型	支座直径/ mm	铅芯直径/ mm	铅芯高度/ mm	封板直径/ mm	橡胶层 厚度/mm	橡胶层 层数	加劲钢板 厚度/mm	加劲钢板 层数	橡胶层总 厚度/mm	支座高度/ mm
LRB700	720.00	104.20	241.00	990.00	7.39	18	4.00	17	133.02	271.02
LNR700	720.00	—	—	990.00	7.39	18	4.00	17	133.02	271.02

1.2 试验环境温度的处理以及记录

由于需要分别在 -20、0 °C 的环境温度下对隔震橡胶支座开展高速压剪试验, 首先介绍试样的降温处理过程。降温前, 在支座铅芯以及中孔内壁布

置了4组热电偶, 以便监测支座内部温度的变化。支座的构造细节与热电偶布置位置如图1所示, 其中, 热电偶埋入的深度均为距离封板内表面5 cm 的位置。

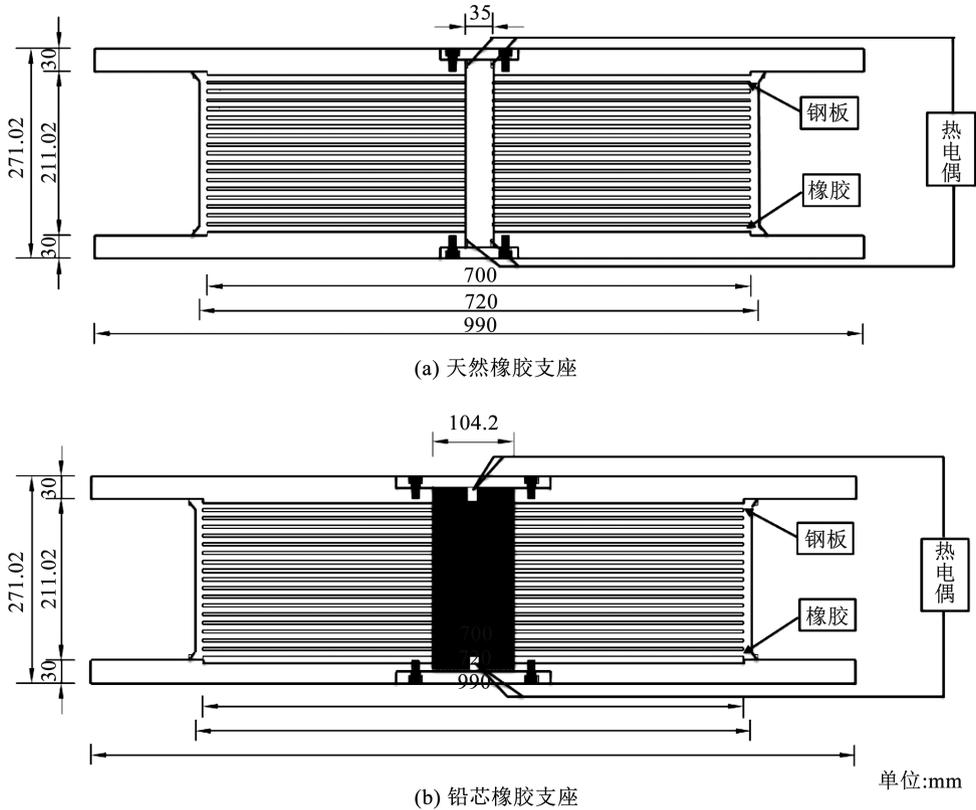


图1 天然与铅芯橡胶支座的构造及热电偶布置细节示意

Fig.1 Configuration features of tearing and location of the rmocouple

采用持续鼓充干冰的方式对隔震橡胶支座进行降温处理(如图2所示)。首先将隔震橡胶支座放置在自制保温箱中, 并向其持续鼓充干冰, 以便低温通过上下封板传递给支座内部。当热电偶读数达到

试验要求后(略低于试验温度, 以考虑试验搬运安装过程引发的升温), 继续保持1~2 h, 使得隔震橡胶支座温度达到稳态。此时, 快速将试样放置于多功能试验机, 并立即开展压剪试验。



(a) 保温隔热装置



(b) 试件降温处理

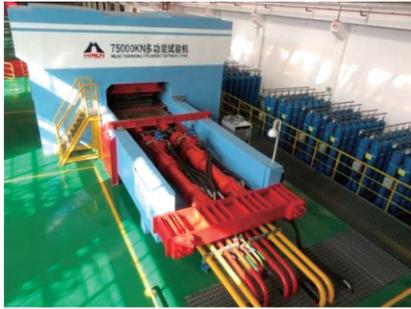
图2 隔震橡胶支座低温处理

Fig.2 Cooling process of specimen

1.3 试验加载方案

本试验采用的多功能加载设备如图 3 所示,其竖向最大载荷达 75 MN,竖向行程为 ±120 mm,水

平最大载荷达 6 MN,水平行程为 ±600 mm,水平最大加载速度为 1 000 mm/s。



(a) 多功能试验机示意



(b) 支座安装现场

图 3 隔震橡胶支座压剪试验现场

Fig. 3 Compression-shear test of specimen

为研究橡胶支座类型、剪切变形、加载频率以及环境温度对隔震橡胶支座力学特性的影响,按照 GB/T 20688. 1—2007《橡胶支座第 1 部分:隔震橡胶支座实验方法》^[25]设计了 54 组工况,其加载工况信息如表 2 所示。其中,竖向荷载为隔震橡胶支座达到标准设防类限值 15 MPa 所承受的载荷;水平加载频率分别为 0. 2、0. 25、0. 3 Hz,峰值速度范围为 83. 5 ~ 626. 4 mm/s;依据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[26]和 GB/T 51408—2021《建筑隔震设

计标准》^[27]的相关规定,本试验剪应变幅值分别为 50%、100%、250%,以考虑小震、中震及大震的影响;此外,依据 GB/T 20688 2—2006《橡胶支座第 2 部分:桥梁隔震橡胶支座》^[28]及 GB 20688. 3—2006《橡胶支座第 3 部分:建筑隔震橡胶支座》^[29],分别选取 -20、0、23 °C 开展温度相关性的试验工况。为了减轻试验中支座温度变化对下一工况的不利影响,在完成每个工况后,将支座静置至少 24 h,再开展下一组工况的试验。

表 2 LRB700 (LNR700) 试验工况

Tab. 2 LRB700 (LNR700) test cases

支座类型	竖向面压/MPa	竖向荷载/kN	加载频率/Hz	剪切变形/%	水平位移/mm	加载速度峰值/(mm·s ⁻¹)
LRB700 (LNR700)	15	5 770	0. 20	50	66. 5	83. 5
				100	133. 0	167. 0
				250	332. 5	417. 6
			0. 25	50	66. 5	104. 4
				100	133. 0	208. 8
				250	332. 5	522. 0
			0. 30	50	66. 5	125. 3
				100	133. 0	250. 6
				250	332. 5	626. 4

本次试验均采用正弦波的方式进行位移控制加载。为了缓解设备在启动和中止阶段所产生的惯性力影响,在图 4 所示的加载波形中增加了进入循环和退出循环。

2 试验结果分析

2.1 试验数据的修正

因本次试验涉及高速、高压、大变形加载,设备内运动部件(包括试件本身)会在试验中产生较大的惯性力以及摩擦力。这些部件产生的惯性力以及摩擦力会明显影响试验数据的准确性与可靠性,以下将详细介绍各自的修正方案。

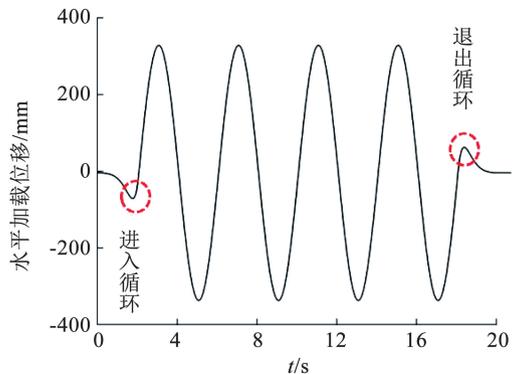
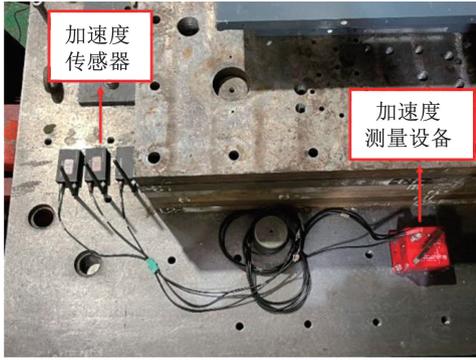


图 4 正弦波加载形式

Fig. 4 Sine loading waveform

2.1.1 设备惯性力的修正

为了量化运动部件的惯性力,在试验前将加速度测量设备布置在工作平台中间(图5(a)),并将



(a) 加速度计布置

与加载系统内部相似的球型滑板支座(图5(b))安装在运动平台上。

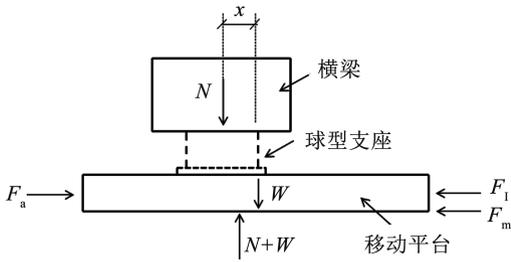


(b) 球型滑板支座

图5 球型滑板支座加速度计布置现场

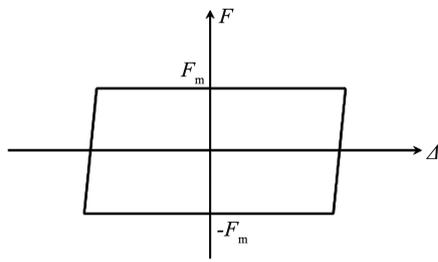
Fig. 5 Mounting spherical slide bearing and accelerometers

加载设备的简化受力图如图6(a)所示。针对系统内部摩擦力与球型滑板支座提供的恢复力,两



(a) 运动部件受力简图

者叠合产生的滞回环如图6(b)所示,即近似处理为由库仑摩擦力围成的平行四边形。



(b) 系统内部摩擦力与球型滑板支座的恢复力滞回曲线

图6 运动部件受力示意

Fig. 6 Force diagram of test apparatus

针对简化受力体系,其水平方向的力平衡方程为

$$F_a = F_m + F_1 \quad (1)$$

$$F_m = F_a - F_1 \quad (2)$$

当试验采用正弦的位移加载方式时,其位移在任意时刻的表达式为

$$x = A \sin \omega t \quad (3)$$

式中: A 为位移幅值, ω 为加载圆频率, t 为加载时间。

此时,加速度与位移之间的解析表达式如下:

$$a = -\omega^2 x \quad (4)$$

因此,运动部件产生的惯性力与位移的关系如下:

$$F_1 = ma = m_h(-\omega^2 x) \quad (5)$$

式中 m_h 为运动部件(包括4个水平作动器的活塞油缸、移动平台、工装板、移动小车以及进行试验的试样)的总质量。

由于 F_m 对位移 x 的一阶导数为零,将式(2)左

右两边同时对位移 x 求导:

$$0 = \frac{dF_a}{dx} - \frac{dF_1}{dx} \quad (6)$$

$$\frac{dF_1}{dx} = -m_h \omega^2 \quad (7)$$

联立式(4)~(7)确定运动部件的质量,即

$$k_x = \frac{da}{dx} = -\omega^2 \quad (8)$$

$$k_y = \frac{dF_a}{dx} = \frac{dF_1}{dx} = -m_h \omega^2 \quad (9)$$

式中 k_x 与 k_y 分别为加速度计读数以及水平作动器读数关于 x 的斜率。

图7(a)为水平作动器提供的水平力随位移变化的滞回环,虚线即为求解 k_y 的示意直线;图7(b)则是加速度随位移变化的滞回环,虚线即为求解 k_x 的示意直线。将 k_y 除以 k_x ,即可确定运动部件的质量 m_h ,结合加速度计的读数即可获得运动部件任意时刻的惯性力 F_1 。

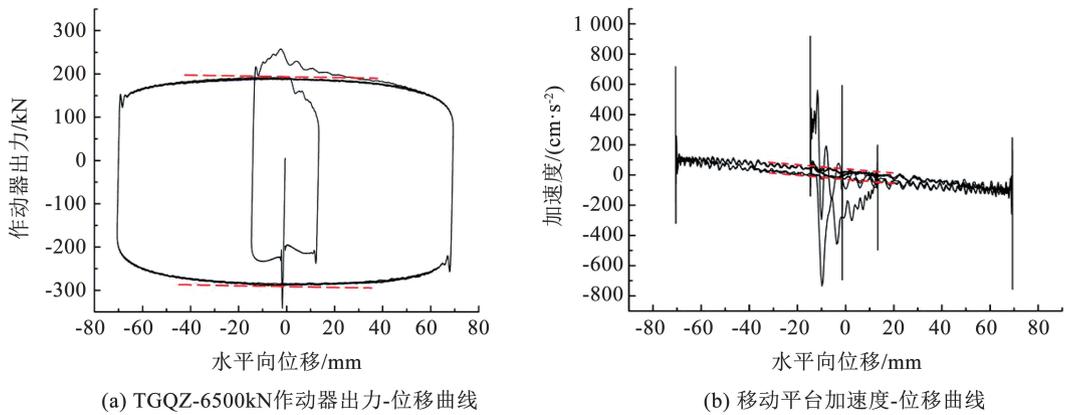


图 7 运动部件惯性力扣除流程示意

Fig.7 Schematic diagram of inertial force deduction process for moving components

2.1.2 设备摩擦力的修正

确定了加载系统中运动部件的惯性力,就可以通过研究球型滑板支座的恢复力以确定加载设备内部的摩擦力。具体步骤如下:

1) 球型滑板支座开展不同位移幅值及不同加载频率的压剪试验(图 8)。

2) 采用小型试验机 SMTM(图 9)进行单独材性试验。确定球型滑板支座试样的摩擦因数随速度变化的曲线。

3) 将球型滑板支座的摩擦因数乘以设备的竖向压力计读数 N ,即可确定支座试样的恢复力。再进一步获得系统在该竖向力作用下的摩擦因数以及与之对应的峰值速度。

4) 通过系统内部摩擦因数与峰值加载速度的数据,拟合摩擦因数与加载速度的关系曲线(图 10(a)),进而确定系统在不同位移幅值条件下摩擦因数与加载速度的滞回环(图 10(b))。

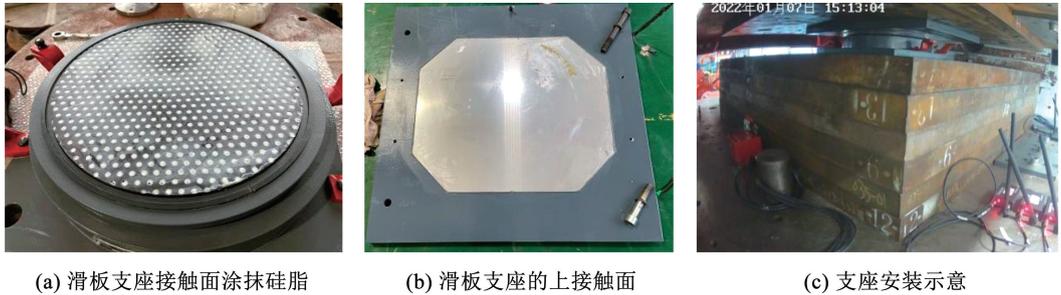


图 8 球型滑板支座压剪试验

Fig. 8 Compression-shear test of spherical slide bearing

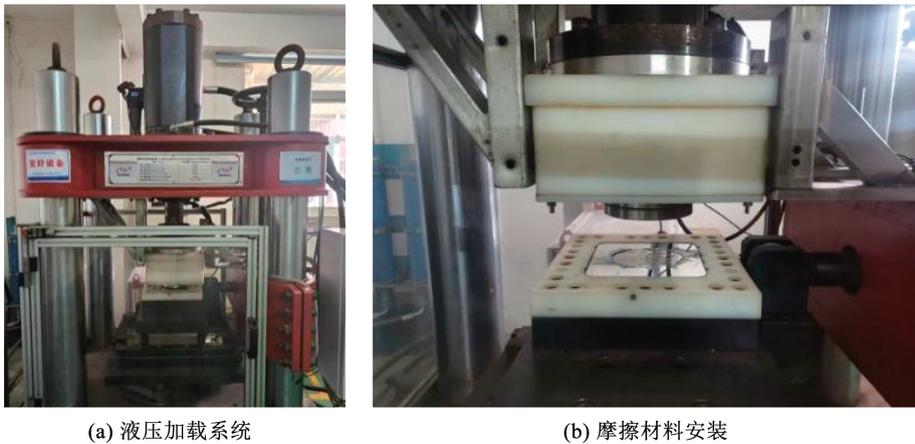


图 9 SMTM 小型试验机

Fig.9 SMTM testing machine

5) 将水平作动器出力 F_a 减去运动部件的惯性力, 可获得 LRB700 扣除惯性力的滞回曲线(图 10(c)),

进而确定 LRB700 试样在扣除系统摩擦力之后的真实水平滞回曲线(图 10(d))。

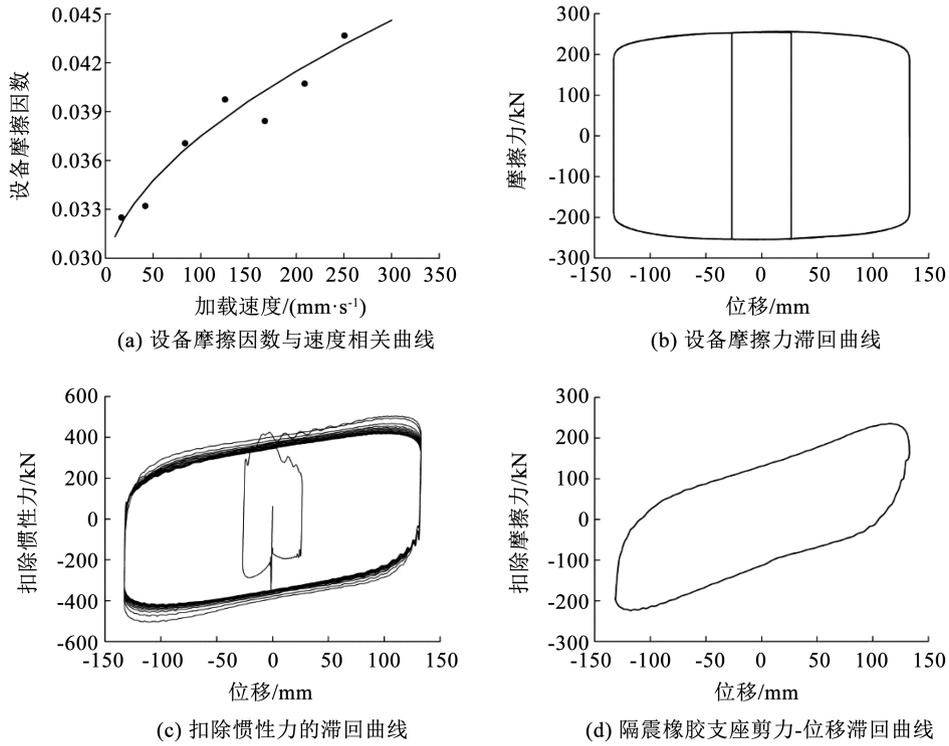


图 10 扣除摩擦力的过程

Fig. 10 Correction process of internal friction forces

设备惯性力及摩擦力的修正流程如图 11 所示。

为了验证上述关于设备惯性力及摩擦力修正方法的准确性, 将 LRB700-1、LRB700-2 及 LRB700-3 试件在常温条件下剪切应变变为 50%、100% 及 250% 的低速出厂检测试验结果(即生产隔震橡胶支座厂

家提供的检测报告结果, 其中加载频率为 0.02 Hz) 与正式测试的低速试验结果(加载频率为 0.02 Hz) 进行对比, 结果如表 3 所示。其中, 水平屈服剪力以及屈服后水平刚度的计算方法见文献[25]。

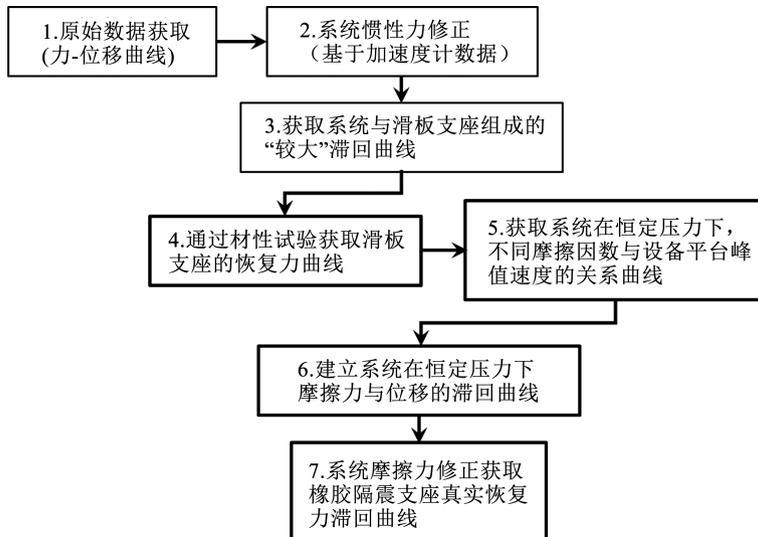


图 11 惯性力及摩擦力的修正流程

Fig. 11 Flow chat of internal forces and frictional forces correction process

表 3 设备惯性力及摩擦力修正方法准确性的验证

Tab. 3 Verification of accuracy of equipment inertial force and frictional force correction methods

支座类型	支座型号	水平屈服剪力/kN		水平屈服剪力 差值/%	屈服后水平刚度/(kN·mm ⁻¹)		屈服后水平 刚度差值/%
		出厂检测结果	试验结果		出厂检测结果	试验结果	
LRB700-50%	1(0.20 Hz)	62.474 6	60.648 2	3	1.233 3	1.180 4	4
	2(0.25 Hz)	100.541 8	95.065 1	5	1.139 6	1.081 4	5
	3(0.30 Hz)	71.391 9	71.508 0	0	1.029 0	0.990 7	4
LRB700-100%	1(0.20 Hz)	120.338 3	111.391 8	7	0.964 0	0.910 9	6
	2(0.25 Hz)	140.353 7	131.146 5	7	1.076 1	0.986 0	8
	3(0.30 Hz)	130.612 4	126.766 9	3	0.882 5	0.794 0	10
LRB700-250%	1(0.20 Hz)	130.853 4	125.487 8	4	0.773 9	0.769 7	1
	2(0.25 Hz)	166.652 3	164.357 1	1	0.768 0	0.757 9	1
	3(0.30 Hz)	160.734 2	150.650 1	6	0.689 5	0.640 2	7

由表 3 可知,经过修正后的试验结果,即 LRB700 的水平屈服剪力及屈服后水平刚度与出厂检测结果的误差均在 10% 以内,充分表明本文提出的设备惯性力及摩擦力修正方法的准确性与可靠性。

2.2 隔震橡胶支座内部温度的变化

为了探究隔震橡胶支座在不同频率以及不同剪切应变下内部温度的变化趋势,列出了常温(23 ℃)条件下 LRB700 内部铅芯随加载圈数增加的变化曲线。鉴于本次试验中温度的采集以及高速压剪试验荷载位移的采集是两个独立系统,其相互之间存在一定的时差。为了让两个系统测量的数据达到同一起始时刻,在试验前记录了两个采集系统的时间差。此外,温度设备的采集频率为 1 Hz,而高速压剪实验设备的采集频率为 100 Hz。为了保证加载过程中任一时刻都有相应的位移与温度数据,首先确定试验的起始与结束时间,至于每秒之间的温度则通过线性内插的方式确定。如图 12 所示,实线表示靠近上封板的两个热电偶读数平均值,虚线表示靠近下封板的两个热电偶读数平均值。LNR700 中孔内壁所埋热电偶位置在常温(23 ℃)条件下随加载圈数增加的变化关系如表 4 所示。

值得一提的是,在进行低温工况时,温度的采集处于相对不稳定状态,其主要原因是试样放到加载设备上低温试验前,需要提前施加 15 MPa 的竖

向压应力,铅芯会提前受压,导致铅芯内部采集的温度并不稳定。即使将试件放在加载设备中继续降温,其铅芯温度的起始点数据仍然不够稳定,然而此时的温度不稳定并不是由水平加载造成的。尽管低温工况中温度采集的数据不够稳定,本文针对每个支座都采取了七八个小时的持续降温,并在试验前确保铅芯内部温度保持恒定且略低于试验工况所要求的温度。因此,本文关于隔震橡胶支座的低温工况试验数据是可靠且稳定的。

由图 12 可知,LRB700 内部铅芯上、下侧的温度随加载圈数的增加,温度变化规律大致相同,表现出关于高度的对称性。当剪应变为 50% 时,铅芯上、下侧温度的平均值上升 34.9 ℃;当剪应变为 100% 时,铅芯上、下侧温度的平均值上升 32.4 ℃;当剪应变为 250% 时,铅芯上、下侧温度的平均值上升 19.2 ℃。铅芯温度的上升主要与加载圈数,即加载持时密切相关;持时越长,铅芯温度上升幅度越大。此外,对同一支座而言,相同加载时间内,剪应变越大,外部荷载做功越多,铅芯温度变化更为剧烈。

至于 LNR700 内部的温度变化,由表 4 可知,随加载圈数的增加,其内部温度基本保持不变。当剪应变为 50% 时,LNR700 内部温度的平均值上升 2.2 ℃;当剪应变为 100% 时,LNR700 内部温度的平均值上升 1.8 ℃;当剪应变为 250% 时,LNR700 内部温度的平均值上升 1.6 ℃。

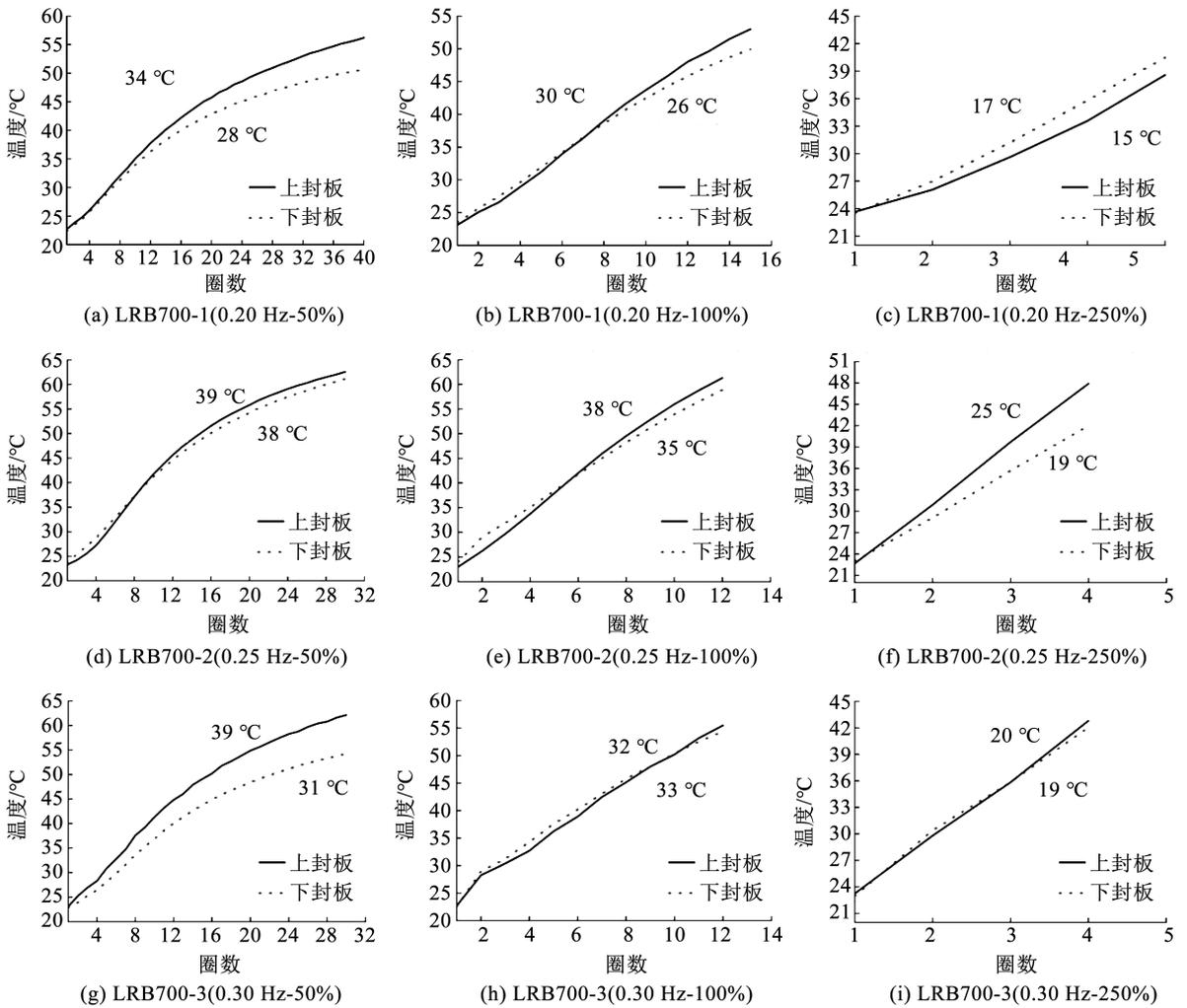


图 12 常温(23 °C)条件下 LRB700 上、下封板温度变化曲线

Fig. 12 Temperature change curves for upper and lower sealing plates of LRB700 at room(23 °C) temperature

表 4 LNR700 支座温度变化

Tab. 4 Temperature change of LNR700

支座类型	加载频率/Hz	剪切应变/%	环境温度/°C	支座温度/°C	变化温度/°C
LNR700	0.20	50	25	23	+2.5
		100	24	23	+1.5
		250	24	23	+1.0
	0.25	50	23	23	+2.9
		100	23	23	+3.1
		250	24	23	+1.7
	0.30	50	23	23	+1.2
		100	26	23	+0.9
		250	23	23	+2.1

2.3 考虑环境温度影响的调整系数研究

GB/T 20688.1—2007《橡胶支座第1部分:隔震橡胶支座试验方法》^[25]中规定,铅芯隔震橡胶支座水平屈服剪力为滞回曲线与y轴截距绝对值之和的平均值(图13):

$$Q_{d,i} = \frac{1}{2}(|+Q_{di}| + |-Q_{di}|) \quad (10)$$

式中: + Q_{di} 为第*i*个滞回曲线与y轴正截距; - Q_{di} 为第*i*个滞回曲线与y轴负截距。

而铅芯隔震橡胶支座的屈服后水平刚度采用以下公式计算:

$$K_{post,i} = \frac{1}{2} \left(\frac{F_C - F_D}{\Delta_C - \Delta_D} + \frac{F_E - F_F}{\Delta_E - \Delta_F} \right) \quad (11)$$

式中: $C、D、E、F$ 分别为图 13 中滞回曲线 $\Delta_i/2$ 和 $-\Delta_i/2$ 位移处的 4 点, 而 Δ_i 与 $-\Delta_i$ 分别代表第 i 个滞回圈中剪切位移的最大值与最小值。因此, 屈服后水平刚度为 CD 与 EF 连线斜率的平均值。

隔震橡胶支座的水平等效刚度则如下计算:

$$K_{h,i} = \frac{F_i - (-F_i)}{\Delta_i - (-\Delta_i)} \quad (12)$$

式中 $F_i、-F_i$ 分别为图 14 中第 i 个滞回圈中最大位移 A 以及最小位移 B 所对应的恢复力。

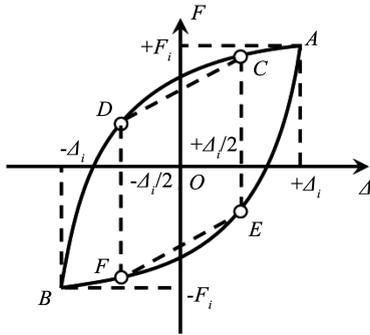


图 13 隔震支座性能指标示意

Fig. 13 Performance index diagram of isolation rubber bearing

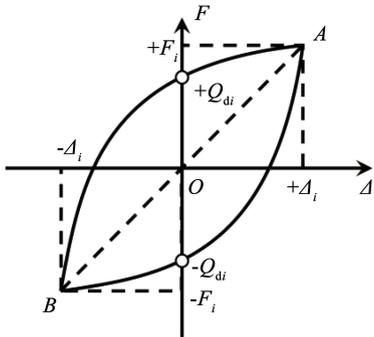


图 14 隔震支座滞回曲线

Fig. 14 Hysteretic curve of isolation rubber bearing

考虑到环境温度对隔震橡胶支座力学性能的影响, GB/T 51408—2021《建筑隔震设计标准》^[27] 附录 D 通过引入 3 个调整系数, 即水平屈服剪力调整系数、屈服后水平刚度调整系数以及水平等效刚度的调整系数, 实现对隔震橡胶支座力学特性的调整。其中, 隔震橡胶支座每个滞回圈的水平屈服剪力、屈服后水平刚度以及水平等效刚度可以通过上述方法加以确定。

为获得水平屈服剪力调整系数、屈服后水平刚度调整系数及水平等效刚度的调整系数, 针对直径 700 mm 的隔震橡胶支座在不同剪应变、加载频率以及温度下的滞回曲线进行统计归纳。考虑到铅芯滞回生热导致温度上升的影响, 主要研究环境温度为 23、0、-20 °C 对隔震橡胶支座力学性能的影响, 提取第一圈滞回曲线所对应的力学性能指标进行分析。此时, 支座在未进行正式试验前已经历多次加载, Scragging 以及 Mullins 效应基本消除, 所以, 隔震橡胶支座在第一圈循环加载中表现较为稳定。同时, 将支座在 0、-20 °C 环境温度下的试验结果除以 23 °C 条件下的实测值以进行归一化处理, 从而得到相应指标(如式(13)~(15)所示)考虑温度效应的修正系数(详细结果见表 5)。

$$Q_d(T) = \frac{Q_d(T)}{Q_d(23\text{ °C})} Q_d(23\text{ °C}) = C_{Q_d}(T) Q_d(23\text{ °C}) \quad (13)$$

$$K_{post}(T) = \frac{K_{post}(T)}{K_{post}(23\text{ °C})} K_{post}(23\text{ °C}) = C_{K_{post}}(T) K_{post}(23\text{ °C}) \quad (14)$$

$$K_h = \frac{K_h(T)}{K_h(23\text{ °C})} K_h(23\text{ °C}) = C_{K_h}(T) K_h(23\text{ °C}) \quad (15)$$

表 5 考虑环境温度对直径 700 mm 隔震橡胶支座温度修正系数

Tab. 5 Temperature correction coefficient for 700 mm diameter isolating rubber bearing

支座类型	水平屈服剪力调整系数	屈服后水平刚度调整系数	水平等效刚度调整系数
LRB700	$C_{Q_d}(T) = 0.4885e^{-0.0153T} + 0.6565$	$C_{K_{post}}(T) = 1.0630e^{-0.0029T}$	$C_{K_h}(T) = 1.1210e^{-0.0048T}$
LNR700	—	—	$C_{K_h}(T) = 0.0659e^{-0.0510T} + 0.9796$

图 15(a)展示了 LRB700 在不同加载工况下第一圈的水平屈服剪力, 将其按照上述步骤归一化处理, 其调整系数曲线如图 15(b)中粗实线所示, 可以看出: 当环境温度为 0 °C 时, LRB700 水平屈服剪力相比 23 °C 上升 15%; 当环境温度为 -20 °C 时, LRB700 水平屈服剪力相比 23 °C 上升 32%。

图 16(a)描述了 LRB700 在不同加载工况下第一圈的屈服后水平刚度, 其调整系数曲线如图 16(b)中粗实线所示, 可以看出: 当环境温度为 0 °C 时, LRB700 屈服后水平刚度相比 23 °C 上升 7%; 当环境温度为 -20 °C 时, LRB700 屈服后水平刚度相比 23 °C 上升 16%。

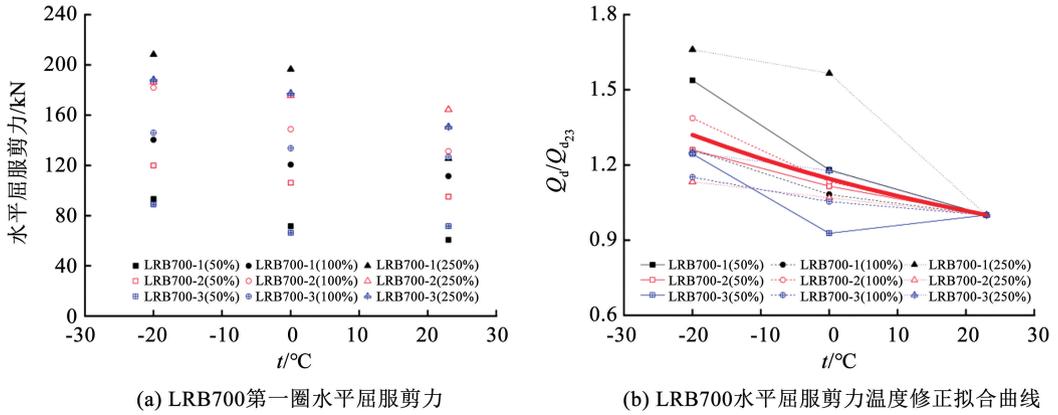


图 15 考虑环境温度对 LRB700 水平屈服剪力的影响系数

Fig. 15 Adjustment coefficient of characteristic strength of LRB700 considering the influence of ambient temperature

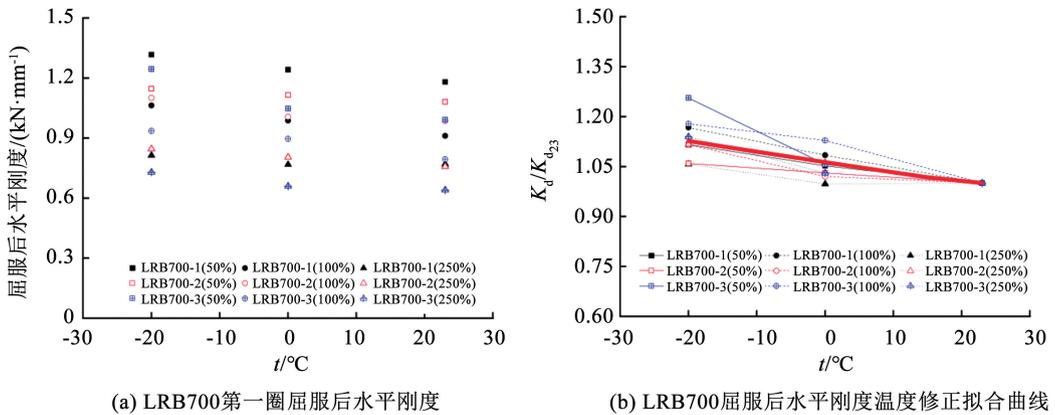


图 16 考虑环境温度对 LRB700 屈服后水平刚度的影响系数

Fig. 16 Adjustment coefficient of horizontal post-yield stiffness of LRB700 considering the influence of ambient temperature

图 17 (a) 与 18 (a) 分别展示了 LRB700 及 LNR700 在不同加载工况下第一圈的水平等效刚度,其调整系数曲线如图 17 (b) 与 18 (b) 中粗实线所示,可以看出:当环境温度为 0 °C 时,LRB700 与

LNR700 水平等效刚度相比 23 °C 分别上升 12%、5%;当环境温度为 -20 °C 时,LRB700 与 LNR700 水平等效刚度相比 23 °C 分别上升 23%、16%。

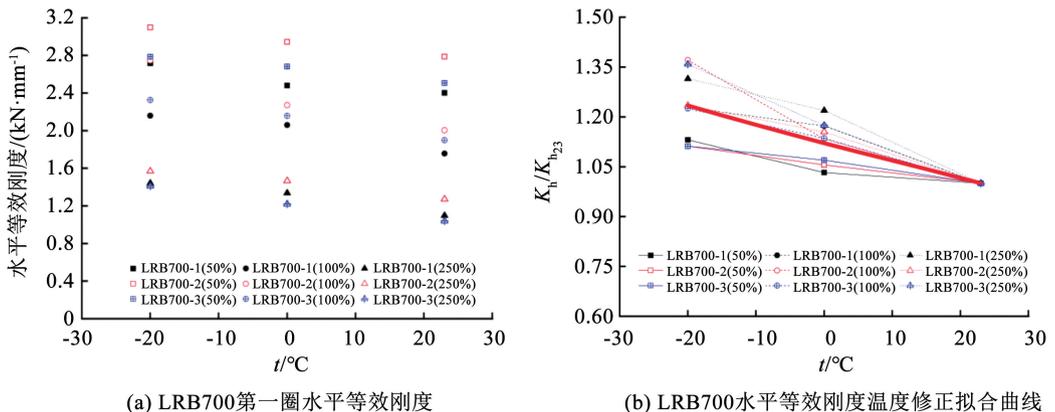


图 17 考虑环境温度对 LRB700 水平等效刚度的影响系数

Fig. 17 Adjustment coefficient of horizontal equivalent stiffness of LRB700 considering the influence of ambient temperature

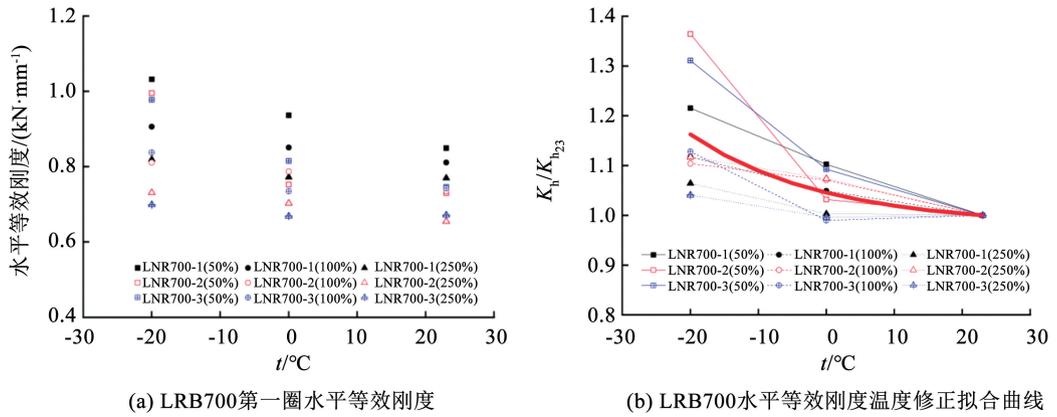


图 18 考虑环境温度对 LNR700 水平等效刚度的影响系数

Fig. 18 Adjustment coefficient of horizontal equivalent stiffness of LNR700 considering the influence of ambient temperature

3 结论

针对直径 700 mm 的隔震橡胶支座,开展了一系列加载频率、剪切应变幅值以及环境温度的高速压剪试验,并提出了关于加载系统内部惯性力以及摩擦力的修正方案,以便准确获取试样的力学性能指标。基于上述修正的试验数据,着重分析了 LRB700 及 LNR700 的内部温度随加载条件变化的相关规律。此外,为了将环境温度效应纳入隔震结构设计流程中,结合相关规范提出了相应的修正系数,并得出以下结论:

1) 对于高速高压加载试验,提出的惯性力及摩擦力的修正方案可以很好地解决设备运动部件惯性力以及系统内部摩擦力带来的不利影响。

2) 随加载圈数的增加,LRB700 内部铅芯上、下侧的温度变化规律大致相同,即表现出关于高度的对称性,其温度的上升幅度主要与加载圈数,即加载持时密切相关,持时越长,铅芯温度上升幅度越大。此外,对同一支座而言,相同加载时间内,剪应变越大,外部荷载做功越多,铅芯温度变化更剧烈,而 LNR700 内部的温度基本保持不变。在剪应变为 50% 时,LRB700 铅芯及 LNR700 内部上、下侧温度的平均值分别上升 34.9、2.2 °C;当剪应变为 100% 时,LRB700 铅芯及 LNR700 内部上、下侧温度的平均值分别上升 32.4、1.8 °C;当剪应变为 250% 时,LRB700 铅芯及 LNR700 内部上、下侧温度的平均值分别上升 19.2、1.6 °C。

3) 环境温度对 LRB700 及 LNR700 的力学性能影响较为显著。当环境温度为 0 °C 时,LRB700 的水平屈服剪力及屈服后水平刚度相比 23 °C 分别上升 15%、7%,LRB700 与 LNR700 水平等效刚度相比 23 °C 分别上升 12%、5%;当环境温度为 -20 °C 时,

LRB700 水平屈服剪力及屈服后水平刚度相比 23 °C 分别上升 32%、16%,LRB700 与 LNR700 水平等效刚度相比 23 °C 分别上升 23%、16%。

由于仅对 LRB700 及 LNR700 开展了温度相关性试验研究,涉及的支座类型以及应变幅值有限。在接下来的工作中,将继续增加环境温度的工况,逐渐丰富试验数据库,并开发考虑环境温度及滞回生热的隔震橡胶支座有限元模型,以实现基于温度相关性以及应变相关性试验的支座力学性能的准确预测,进而在隔震结构的设计环节提出合理的性能指标调整系数,形成完善的理论体系。

参考文献

- [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
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
- [2] 吴彬, 庄军生. 铅芯橡胶支座力学性能及其在桥梁工程中减、隔震应用研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 24(3): 138
WU Bin, ZHUANG Junsheng. Study on mechanical characteristics of lead-rubber bearing and its application for shock reduction/isolation in bridge engineering[J]. China Railway Science, 2004, 24(3): 138
- [3] 李建中, 袁万诚, 范立础. 连续梁桥减、隔震体系的优化设计[J]. 土木工程学报, 1998, 31(3): 47
LI Jianzhong, YUAN Wancheng, FAN Lichu. Optimal design of seismic isolation system for continuous bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 1998, 31(3): 47
- [4] 尹维祥. 叠层橡胶支座稳定性极受低温环境的影响[D]. 兰州: 甘肃工业大学, 2001: 54
YIN Weixiang. The stability of laminated rubber bearing is extremely affected by low temperature environment [D]. Lanzhou: Gansu University of Technology, 2001: 54
- [5] 李慧, 邓学晶, 杜永峰, 等. 寒区叠层橡胶隔震支座拟静力试验研究[J]. 低温建筑技术, 2003(4): 33
LI Hui, DENG Xuejing, DU Yongfeng, et al. Pseudo-static

- experimental study of rubber isolator under low temperature[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2003(4): 33
- [6] GHASEMI H, HIGGINS M S. Sizing up seismic bearings[J]. *Civil Engineering*, 1999, 69(7): 54
- [7] 由世岐, 刘斌, 楼永林. 低温环境对叠层橡胶支座变形特性影响的试验研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(3): 297
YOU Shiqi, LIU Bin, LOU Yonglin. Low-temperature effect on deformation behavior of laminated rubber isolators[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2005, 26(3): 297
- [8] AHN I S, CHEN S S. Nonlinear model-based system identification of lead-rubber bearings[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(2): 318
- [9] 杜永峰, 李慧, 党育, 等. 橡胶隔震支座的低温性能及对动力可靠性的影响[J]. *工程力学*, 2003(增刊1): 452
DU Yongfeng, LI Hui, DANG Yu, et al. Low temperature performance of rubber isolation bearing and its influence on dynamic reliability[J]. *Engineering Mechanics*, 2003(Sup. 1): 452
- [10] 刘文光, 杨巧荣, 周福霖. 建筑用铅芯橡胶隔震支座温度性能研究[J]. *世界地震工程*, 2003, 19(2): 39
LIU Wenguang, YANG Qiaorong, ZHOU Fulin. Temperature properties of lead rubber bearings for building[J]. *World Earthquake Engineering*, 2003, 19(2): 39
- [11] 庄学真, 周福霖, 冯德民, 等. 1200型大直径建筑叠层铅芯橡胶隔震支座性能研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 40(3): 368
ZHUANG Xuezhen, ZHOU Fulin, FENG Demin, et al. Research on mechanical characteristics of 1200 laminated lead steel-plate-laminated-rubber-bearing isolation bearings for building[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 40(3): 368
- [12] 庄学真, 周福霖, 沈朝勇, 等. 600型建筑叠层橡胶隔震装置温度相关性及其老化性能研究[J]. *北京工业大学学报*, 2011, 37(7): 993
ZHUANG Xuezhen, ZHOU Fulin, SHEN Chaoyong, et al. Research on temperature dependence and aging rigidity of 600 laminated steel-plate-laminated-rubber-bearing isolation bearings for building[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2011, 37(7): 993
- [13] 胡紫东. 考虑支座相关性的基础隔震结构地震响应研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011
HU Zidong. Study on the seismic response of base-isolated building including correlation effect[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011
- [14] 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
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
- [15] ZHANG Ruijun, LI Aiqun. Experimental study on temperature dependence of mechanical properties of scaled high-performance rubber bearings[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 190: 107932. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.107932
- [16] KALPAKIDIS I V, CONSTANTINOU M C. Effects of heating on the behavior of lead-rubber bearings. I: theory[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(12): 1440. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000072
- [17] KALPAKIDIS I V, CONSTANTINOU M C. Effects of heating on the behavior of lead-rubber bearings. II: verification of theory[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2009, 135(12): 1450. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000071
- [18] CONSTANTINOU M, WHITTAKER A, KALPAKIDIS Y, et al. Performance of seismic isolation hardware under service and seismic loading (MCEER-07-0012)[R]. New York: Buffalo, 2007
- [19] Guide Specifications for Seismic Isolation Design[S]. 3rd ed. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010
- [20] KALPAKIDIS I V, CONSTANTINOU M C, WHITTAKER A S. Modeling strength degradation in lead-rubber bearing under earthquake shaking[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2010, 39(13): 1533. DOI: 10.1002/eqe.1039
- [21] OZDEMIR G, AVSAR O, BAYHAN B. Change in response of bridges isolated with LRBs due to lead core heating[J]. *Soil Dynamics & Earthquake Engineering*, 2011, 31(7): 921. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.01.012
- [22] 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. DOI: 10.1002/eqe.2170
- [23] OZDEMIR G. Lead core heating in lead rubber bearings subjected to bidirectional ground motion excitations in various soil types[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2014, 43(2): 267. DOI: 10.1002/eqe.2343
- [24] OZDEMIR G. Formulations for equivalent linearization of LRBs in order to incorporate effect of lead core heating[J]. *Earthquake Spectra*, 2014, 31(1): 317. DOI: 10.1193/041913EQS107M
- [25] 广州大学工程抗震研究中心. 橡胶支座第1部分: 隔离橡胶支座试验方法; GB/T 20688.1—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007
Engineering Seismic Research Center of Guangzhou University. Rubber bearings part 1: seismic protection isolators test methods: GB/T 20688.1—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范; GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑隔震设计标准; GB/T 51408—2021[S]. 北京: 北京计划出版社, 2021
Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People's Republic of China. Standard for seismic isolation design of building: GB/T 51408—2021[S]. Beijing: Beijing Jihua Press, 2021
- [28] 广州大学工程抗震研究中心. 橡胶支座第2部分: 桥梁隔震橡胶支座; GB/T 20688.2—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
Engineering Seismic Research Center of Guangzhou University. Rubber bearings part 2: elastomeric seismic-protection isolators for bridges: GB/T 20688.2—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006
- [29] 广州大学工程抗震研究中心. 橡胶支座第3部分: 建筑隔震橡胶支座; GB 20688.3—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
Engineering Seismic Research Center of Guangzhou University. Rubber bearings part 3: elastomeric seismic protection isolators for buildings: GB 20688.3—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006