

建筑隔震橡胶滑板支座试验设计与研究

彭立群，林达文，刘立峰，王进*，杨淙浩，张志强，丁行武
(株洲时代新材料科技股份有限公司，湖南 株洲 412007)

摘要：针对建筑隔震橡胶滑板支座力学性能试验，分析橡胶滑板支座产品标准和方法标准，依据 GB 20688.5—2014 设计橡胶滑板支座压剪新型试验装置，研究橡胶滑板支座压缩性能压应力相关性、剪切性能压应力相关性、剪切性能相关性加载速度相关性、剪切性能相关性温度相关性、剪切性能相关性反复加载次数相关性、老化性能、水平极限性能。结果表明：新型试验设计结构合理且满足试验要求，压应力增加、压缩区间刚度变小、水平初始刚度变大、动摩擦系数变小；加载速度变大、水平初始刚度和动摩擦系数变大；温度降低、水平初始刚度变大、动摩擦系数变化不明显；支座老化试验后刚度变大 28%；极限剪切 500 mm 支座具有较好的初始刚度摩擦系数。

关键词：橡胶滑板支座；力学性能；试验研究

引用论文：彭立群，林达文，刘立峰，等. 建筑隔震橡胶滑板支座试验设计与研究[J]. 橡塑技术与装备，2026，52(3):53-59.

中图分类号：TQ336.5

文章编号：1009-797X(2026)07-0053-07

文献标识码：B

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2026.07.012

建筑隔震橡胶滑板支座（简称支座）是一种新型的减隔震产品，主要由橡胶、金属和高分子材料滑板组成，同时具有隔震和耗能作用，具备普通橡胶支座和滑动支座的功能，不仅可以承受较大的竖向载荷，而且可以形成较大的水平反复滑动位移，主要应用于建筑减隔震系统，对提高建筑结构的安全性和可靠性发挥十分重要的作用。

为了在正式使用前获取支座的各项性能参数，文章以国内企业送检的某型支座为研究对象，分析橡胶滑板支座产品标准和方法标准，不仅优化了试验方案，而且对支座力学性能进行了试验研究，研究成果为支座的研发和试验起到重要设计参考作用^[1-3]。

1 橡胶滑板支座

橡胶滑板支座由上平板、镜面不锈钢板、耐磨板、金属隔板、橡胶和下平板组成，其中下端橡胶支座是通过硫化工艺整体成型，同时在橡胶支座上端面设计有高分子材料滑板，与镜面不锈钢板形成一对滑动摩擦副，两者之间通常涂装硅油脂，以便获得较小的摩擦系数，相对传统的橡胶支座他能形成较大的水平位移，相对传统的摩擦摆支座他又能获得较好的竖向变形，因此他兼顾了两者的优点，具有较好的减隔震和耗能作用，详见图 1 所示。

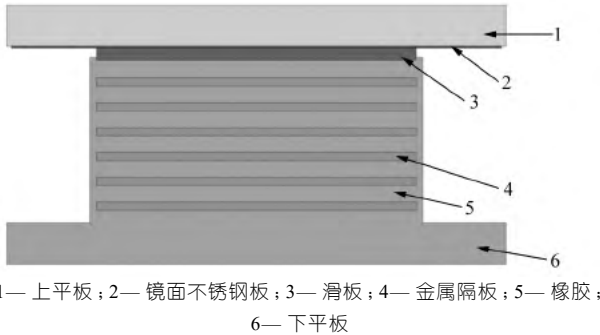


图 1 橡胶滑板支座

2 标准分析

建筑隔震橡胶滑板支座标准主要分方法标准和产品标准，其中方法标准主要参照 GB/T 20688.1—2007《橡胶支座 第 1 部分：隔震橡胶支座试验方法》，产品标准主要参照 GB 20688.5—2014《橡胶支座 第 5 部分：建筑隔震弹性滑板支座》，标准 7.3 规定了支座的压缩性能、剪切性能、压缩性能压应力相关性、剪切性能压应力相关性、剪切性能相关性加载速度相关性

作者简介：彭立群（1983—），男，高级工程师，长期从事桥梁建筑减隔震产品试验设计与研究工作。

基金项目：湖南省重点领域研发计划项目：火安全先进高分子材料制备技术，项目号 2023GK2090

* 通讯作者

性、剪切性相关性温度相关性、剪切性相关性反复加载次数相关性、水平极限性能、竖向极限抗压性能、老化性能、徐变性能试验项目,除剪切性能按标准附录 C 进行,其余项均按 GB/T 20688.1—2007 执行。

3 试验

3.1 试验设备

2 500 t 二维压剪加载试验机,垂向最大载荷 2 500 t,水平最大载荷 200 t、垂直最大垂向安装空间 1 m、水平安装空间 2 m,最大行程 ± 500 mm,单边最大行程 1 m,满足支座压缩和剪切试验要求。



图 2 压缩\剪切试验

3.2 试验装置

3.2.1 改进前方案

主要分侧面挡块结构和分级调节结构 2 种,分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示。其中侧面挡块结构重点设计在平台两侧安装承载挡块横梁,通过丝杆调节来夹持支座,这种方式不仅影响试样水平安装,而且操作不便。分级调节结构是指设计独立的承载平台,分布距离设计有 T 型槽,通过在不同 T 型槽安装固定板配合丝杆调节来夹持支座,其中 T 型槽进行粗调、丝杆进行微调^[4~7]。

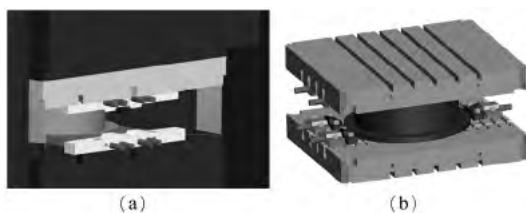


图 3 改进前试验方案

3.2.2 改进后方案

改进后设计一种下沉式结构平台,创新设计后方案将原有安装于平台上平面的夹持块和丝杆,如图 4。安装于平台的预先设计的导向槽内,将夹持块以传动丝杆的方式串联安装,丝杆由原来手动调节方式优化到电动调节,这种结构不仅方便了试样水平安装,而

且提升了试验安装效率。

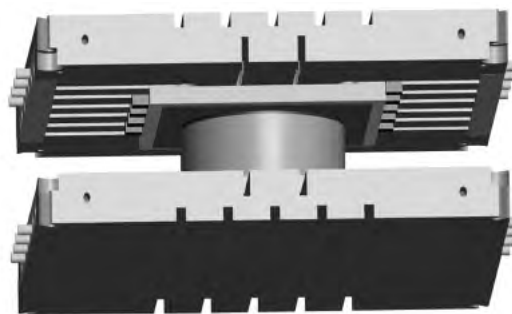


图 4 改进后试验方案

试验装置主要平台、侧固定块、丝杆和夹持块组成,如图 5。所述的丝杆以下沉方式导向槽,通过电动调节方式促使夹持块从两侧向中间移动,夹持支座进行剪切试验。这种方式试验设计 2 个橡胶支座组对进行试验。

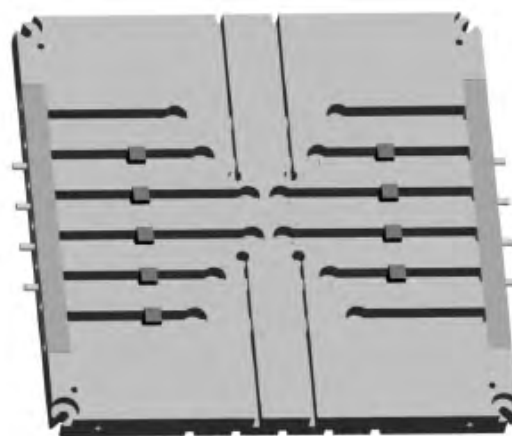


图 5 改进后试验装置

3.3 强度计算

为验证大位移剪切改进后试验工装结构强度是否满足试验要求,针对试验工装关键承载件静态性能进行分析计算,结果详见图 6~7。关键承载件最大应力均小于工装材料 Q345B 要求值,满足试验要求。

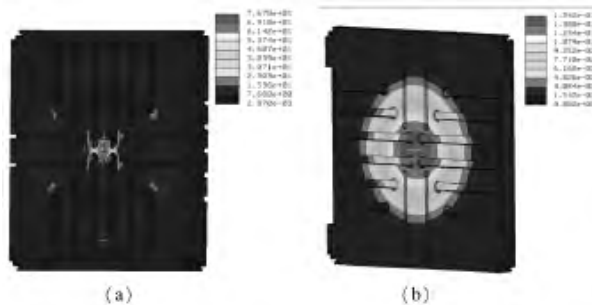


图 6 平台应力/变形云图

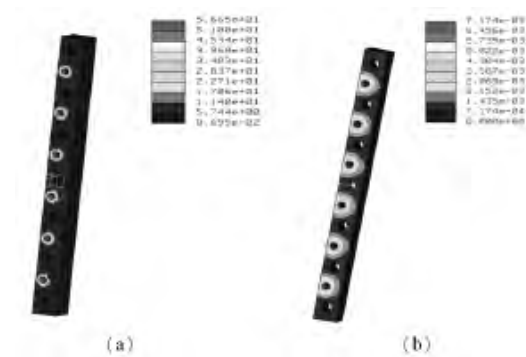


图7 挡块应力/变形云图

4 结果与讨论

4.1 压缩性能 (压应力相关性)

4.1.1 试验方法

支座安装于试验机加载中心, 保证水平剪切位移为零, 设计基准面压 P 为 25 MPa, 工况 1: 压应力 $1 \pm 0.3 P$, 最大压缩载荷 12 390 kN, 加载速度 12 390 kN/min, 连续加载 3 个循环, 记录第 3 个循环载荷与变形曲线, 刚度计算区间 (6 681~12 390)kN; 工况 2: 压应力 $1 \pm 0.5 P$, 最大压缩载荷 14 281 kN, 加载速度 14 281 kN/min, 连续加载 3 个循环, 记录第 3 个循环载荷与变形曲线, 刚度计算区间 (4 768~14 281)kN; 工况 3: 压应力 $1 \pm 1.0 P$, 最大压缩载荷 19 040 kN, 加载速度 19 040 kN/min, 连续加载 3 个循环, 记录第 3 个循环载荷与变形曲线, 刚度计算区间 (0~19 040)kN。

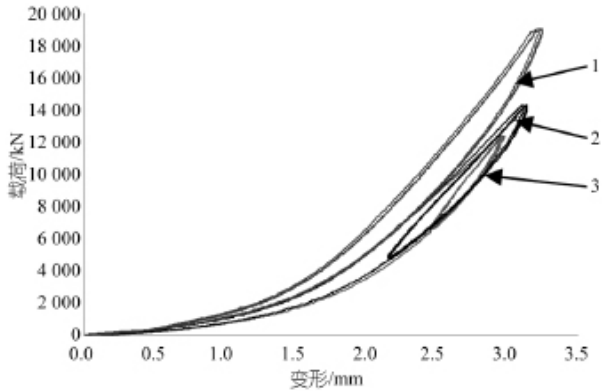
4.1.2 结果及分析

支座压缩刚度主要分整体刚度和区间刚度, 其中整体刚度是指压缩载荷从零点到峰值载荷的趋势线刚度, 区间刚度是指支座工作载荷区间的刚度, 因为支座始终要承受一个来自上部建筑结构的载荷, 同时在特殊情况下会在工作载荷和峰值载荷之间产生一定的压缩变形, 这就是区间刚度, 相对于整体刚度、区间刚度更适合表征支座的压缩性能。

不同压应力对整体压缩刚度的影响: 从图 8 得知, 压应力增加压缩刚度曲线整体斜率在增加, 对应的压缩刚度变大, 导致压缩刚度变大的原因主要由橡胶本身的非线性和支座结构 2 个因素共同决定, 因为橡胶本身可以提供一种变刚度, 即在小载荷区间表现为小刚度, 在大载荷区间表现为大刚度, 但是如果仅靠这种变刚度特性是难以在大承载工况支座产品发挥较好的作用, 更重要的还是要通过橡胶与金属夹层结构来提供更大的承载刚度, 可以改变金属隔板的数量和改变夹层橡胶的厚度, 这种方法对刚度的影响更为明显。

结合试验结果来分析, 在 3 种试验工况下压缩载荷小于 $1/3$ 时, 曲线斜率明显偏小, 压缩载荷大于 $1/3$ 时, 曲线斜率明显变大, 这是因为在加载初期橡胶具有足够的变形空间, 越是到加载后期, 即便是继续增加加大压缩载荷, 橡胶变形越来越小, 此时橡胶处于极限抗压状态, 对橡胶的抗压强度提出更的要求, 所以增加压缩载荷, 在橡胶未发现破坏的前提下, 压缩刚度变大。

不同压应力对区间压缩刚度的影响: 整体是评价支座整体压缩性的参数, 但不能用于评价支座真正意义上的压缩刚度, 因为只有区间刚度, 我们也可以理解为工作刚度, 因为支座始终处于预压工作状态, 从图 9 得知, 区间压缩刚度随压应力增加而减小, 3 种不同压应力工况对应的压缩刚度分别为: 11 236 kN/mm、9 744 kN/mm、5 862 kN/mm, 这是因为区间刚度的载荷计算区间越大, 载荷峰值与谷值之间趋势线斜率在变小, 这只能说是支座的工作载荷区间越大, 支座所表现的刚度越小, 而并非支座本身的刚度发生了变化。所以在支座结构设计时必须设计好工作载荷区间, 与实际运用工况保持一致。



1— $1 \pm 0.3 P$; 2— $1 \pm 0.5 P$; 3— $1 \pm 1.0 P$

图8 压缩载荷—变形曲线

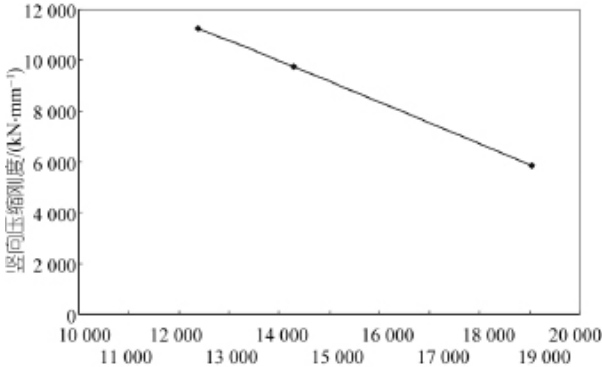


图9 压缩载荷—压缩刚度曲线

4.2 剪切性能 (压应力相关性)

4.2.1 试验方法

支座安装于试验机加载中心, 垂向分别施加压应力 0.5 P、1.0 P、2.0 P 并保持恒定不变, 水平施加剪切位移 ± 100 mm, 记录 4 种不同压应力条件下的水平初刚度和动摩擦系数。

4.2.2 结果及分析

不同压应力对水平初始刚度的影响: 图 10 是不同压应力与水平初始刚度曲线, 结果表明水平初始刚度随压应力增加而变大, 4 种压应力下的水平初始刚度分别为 13.36 kN/mm、14.61 kN/mm、15.67 kN/mm、18.86 kN/mm。初始刚度是支座在克服初始摩擦力之前因橡胶变形而发生的刚度, 只要发生的初始滑动位移, 支座橡胶就无法断续承受水平剪切变形, 进而转变为滑板与镜面不锈钢板的滑动摩擦, 橡胶将恢复到原有状态。在摩擦系数不变的情况下, 增加压应力可以增加支座的水平剪切力, 在剪切变形不变的情况下, 支座初始剪切刚度变大。

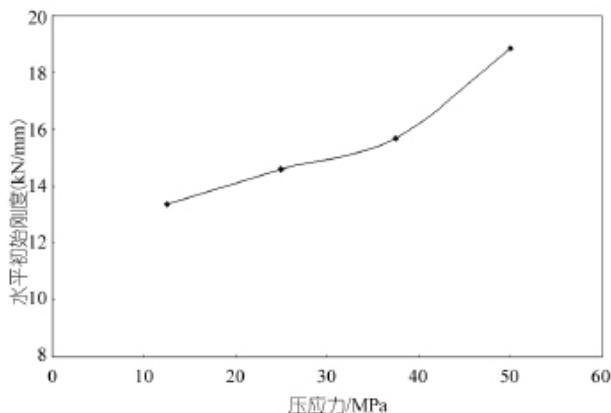


图 10 不同压缩应力—水平初始刚度曲线

不同压应力对动摩擦系数的影响: 图 11 是不同压应力与动摩擦系数曲线, 结果表明动摩擦系数随压应力增加有变小的趋势, 但是变化率不明显, 4 种压应力下的动摩擦系数分别为 0.072、0.051、0.047、0.045。动摩擦系数是支座发生初静摩擦之后因反复动态位移产生的摩擦系数, 摩擦系数通常取决摩擦材料与对摩擦材料本身的材料属性, 支座采用滑板主要高分子材料耐磨板, 对磨体是金属材料的镜面不锈钢板, 在摩擦材料不变的情况, 增加压应力对支座的动摩擦系数影响不明显, 但是在 0.5 P 和 1.0 P 压应力转换区间, 此时的动摩擦系数变化率偏大, 这主要取决两个方面的因素, 一方面 0.5 P 是首次摩擦试验, 摩擦材料和

润滑材料之间还是充分的接触和滑动, 在这种条件下测量摩擦系数会偏大, 另一方面是不论是金属材料还是高分子材料, 在压应力的过程中同本身会有一个内部应力调节过程和压缩变形调节过程, 在内应力和变形充分调节后能获得一个更小的摩擦系数。

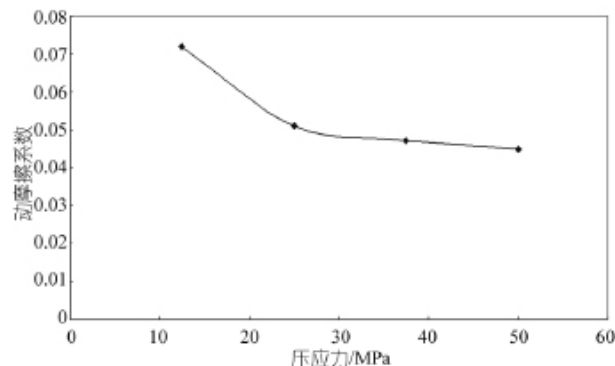


图 11 不同压缩应力—动摩擦系数曲线

4.3 剪切性能 (加载速度相关性)

4.3.1 试验方法

支座安装于试验机加载中心, 垂向加载设计基准面压 P 为 25 MPa 并保持不变。水平施加剪切位移 ± 100 mm, 加载频率分别为 0.001 Hz、0.005 Hz、0.01 Hz、0.1 Hz、0.5 Hz, 记录 5 种不同加载速度条件下的水平初刚度和动摩擦系数。

4.3.2 结果及分析

不同加载速度对水平初始刚度的影响: 图 12 是不同加载速度与水平初始刚度曲线, 结果表明水平初始刚度随加载速度增加而变大, 5 种压应力下的水平初始刚度分别为 12.36 kN/mm、12.51 kN/mm、13.03 kN/mm、13.54 kN/mm、14.83 kN/mm。这是因加载速度越快支座橡胶的滞后效应越明显, 在同等动态剪切变形的情况动态载荷增加、剪切刚度变大, 从试验数据分析在 0.1 Hz 之前加载速度对水平初始刚度的影响不是太明显, 这是因类 0.1 Hz 之前还处准静态加载试验状态, 在 0.1~0.5 Hz 之间频率对水平初始刚度影响较为明显。

不同加载速度对动摩擦系数的影响: 图 13 是不同加载速度与动摩擦系数曲线, 结果表明动摩擦系数随压应力增加有变大的趋势, 但是变化率不明显, 4 种压应力下的动摩擦系数分别为 0.024、0.033、0.037、0.063、0.071。影响摩擦系数的主要因素的主要原因有摩擦材料的种类和化学成分、摩擦材料的表面状态、接触面的正应力、变形温度、加载速度和润滑剂。

从试验数据来分析, 频率增加导致加载速度变快, 摩擦产生的温度越高、同时通过反复摩擦材料表面状态也发生的变化, 尤其是频率达 0.5 Hz 后频率对摩擦系数的影响较为明显。

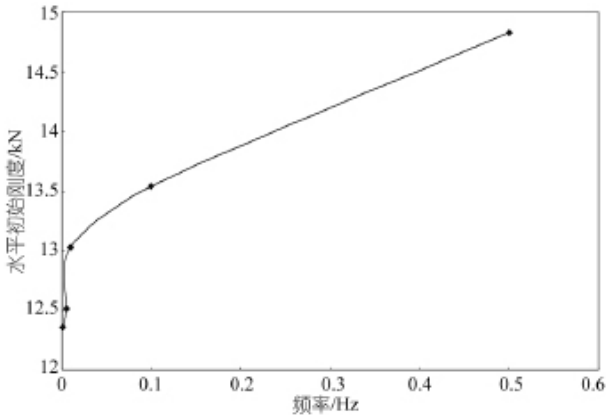


图 12 不同加载速度—水平初始刚度曲线

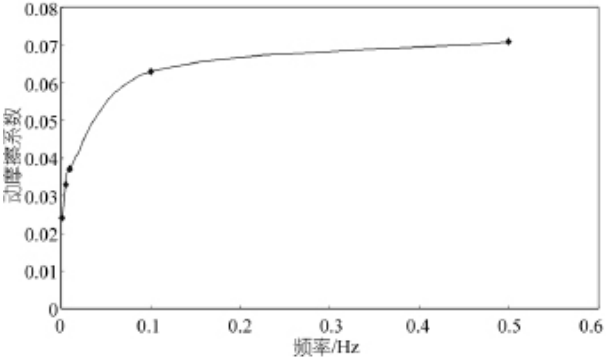


图 13 不同加载速度—动摩擦系数曲线

4.4 剪切性能 (温度相关性)

4.4.1 试验方法

试验前将支座分别 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冷冻 24 h，取出后立即进行试验。垂向加载设计基准面压 P 为 25 MPa 并保持不变。水平施加剪切位移 $\pm 100\text{ mm}$ ，记录 5 种不同温度条件下的水平初刚度和动摩擦系数。

4.4.2 结果及分析

不同温度对水平初始刚度的影响：图 14 是不同温度与水平初始刚度曲线，结果表明常温到高温阶段温度对水平初始刚度影响不明显，在低温阶段温度降低增加水平初始刚度变大，5 种温度下的水平初始刚度分别为 29.67 kN/mm 、 27.76 kN/mm 、 22.06 kN/mm 、 19.64 kN/mm 、 19.12 kN/mm 。这是因为橡胶材料的耐高温性能优于耐低温性能。

不同温度对动摩擦系数的影响：图 15 是不同温度与动摩擦系数曲线，结果表明：相对于压应力、加载

速度，温度对动摩擦系数的影响最不明显，5 种温度下的动摩擦系数分别为 0.03、0.031、0.032、0.037、0.042。

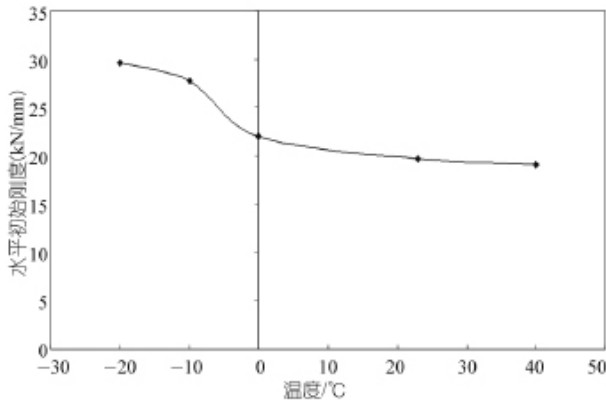


图 14 不同温度—水平初始刚度曲线

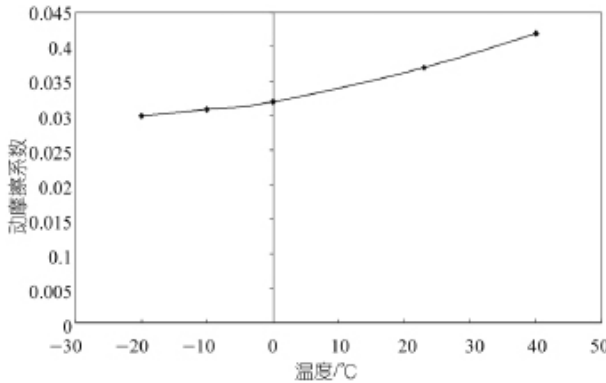


图 15 不同温度—动摩擦系数曲线

4.5 重复加载相关性

4.5.1 试验方法

支座安装于试验机加载中心，垂向加载设计基准面压 P 为 25 MPa 并保持不变。水平施加剪切位移 $\pm 100\text{ mm}$ ，连续加载 50 个循环，计算第 3 个循环与第 50 个循环之间的动摩擦系数及变化率。

4.5.2 结果及分析

从图 16 得知：随着加载次数增加，滞回曲线的包围面积越来越小，支座相应的耗能在变小，同等剪切变形对应的载荷在变小，在压应力不变的情况下，剪切载荷变小，摩擦系数在变小。其中第 3 个循环与第 50 个循环的摩擦系数分别为 0.055 和 0.073，其中变化率为 -24.6% 。

4.6 热老性能

4.6.1 试验方法

试验前将支座在高温 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下放置 14 天，取出后立即进行试验。试验时垂向加设计基准面压 P 为

25 MPa 并保持不变。水平施加剪切位移 ± 100 mm, 连续加载 3 个循环, 记录循环载荷与变形曲线图。

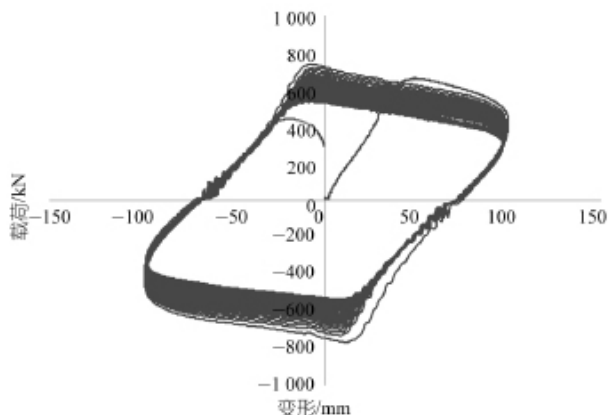
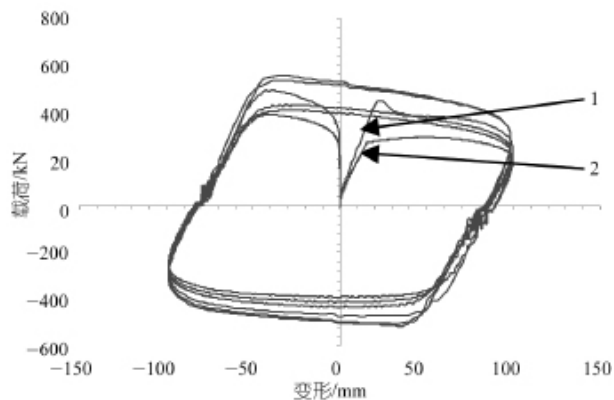


图 16 重复加载相关性曲线

4.6.2 结果及分析

图 17 是支座老化前后剪切载荷 - 变形曲线, 不论是老化前还是老化后曲线光滑无异常, 但在老化后在相同变形条件下剪切载荷明显变小, 其中老前后的水平初始刚度分别为 14.98 kN/mm、19.18 kN/mm, 刚度变化率 28%。



1—老化后; 2—老化前

图 17 老化前剪切载荷—变形曲线

4.7 极限性能

4.7.1 试验方法

支座安装于试验机加载中心, 垂向分别加载设计基准面压 P 为 25 MPa 并保持不变。水平单边施加变形 500 mm, 记录载荷与变形曲线图。

4.7.2 结果及分析

从图 18 是极限剪切载荷与变形曲线图, 结果说明支座初始滑移的位移和载荷分别是 85 mm 和 350 kN, 在滑移之前支座剪切载荷随变形呈非线性递增, 且曲线光滑无异常, 当剪切位移大于 85 mm 后支座由剪切

变形状态转变为滑动摩擦状态, 剪切位移增加, 剪切载荷由 350 kN 下降到 290 kN 并保持不变至最大剪切位移 500 mm, 在这个试验过程中包括了水平初始刚度和滑动摩擦 2 个试验, 这也是滑板支座的特别之处, 滑板同时具备普通橡胶支座和滑动支座的双重功能。试验结果表明滑板不仅具有较高的初始刚度, 而且有良好的滑动摩擦性能。

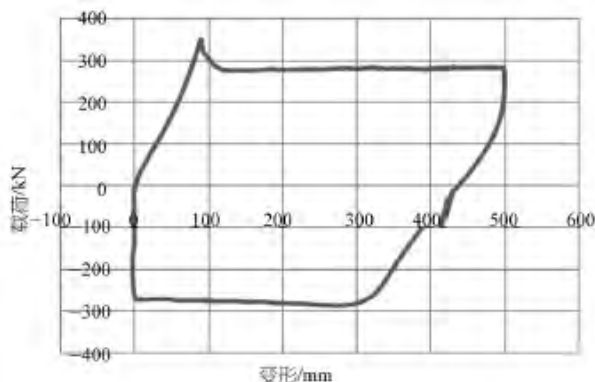


图 18 极限水平剪切载荷—变形曲线

5 结束语

(1) 通过分析建筑隔震橡胶滑板支座的结构与试验标准, 设计新型试验装置, 为橡胶支座类产品试验设计提供参考。

(2) 结果表明: 新型试验设计结构合理且满足试验要求, 压应力增加、压缩区间刚度变小、水平初始刚度变大、动摩擦系数变小; 加载速度变大、水平初始刚度和动摩擦系数变大; 温度降低、水平初始刚度变大、动摩擦系数变化不明显; 支座老化试验后刚度变大 28%; 极限剪切 500 mm 支座具有较好的初始刚度摩擦系数。

参考文献:

- [1] 于芳, 周福霖. 双向隔震铁路桥梁与列车的耦合振动响应研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(6): 17-21.
- [2] 周亚栋, 朱文正. 连续梁桥铅铰橡胶支座减震效果的评定方法[J]. 铁道学报, 2008, 30(4): 59-64.
- [3] 陈长海. 高承载力隔震支座的力学性能初步研究[J]. 世界桥梁, 2017, 45(4): 50-53.
- [4] 彭立群, 林达文. 铅芯橡胶支座力学性能试验设计与研究[J]. 轨道交通材料, 2023, (1): 42-46.
- [5] 张银喜, 郝红肖. 卡槽式弹性滑板橡胶支座变形特性研究[J]. 特种橡胶制品, 2017, 38(2): 56-57.
- [6] 彭立群, 林达文. 橡胶弹性元件阻尼和损耗角试验设计与研究[J]. 特种橡胶制品, 2019, 40(6): 50-54.
- [7] 王进, 谭帅霞, 林达文. 轨道交通橡胶弹性元件配方分析和性能试验技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2013.

