

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.066



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



重力井曲面摩擦摆支座及其抗震性能

曹飒飒, 张飞涛, 张力文

(广州大学土木工程学院, 广州 510006)

摘要:在强震或近场地震动作用下,传统隔震支座桥梁存在支座残余位移和桥墩内力响应大的问题。受科学馆重力井曲面设施的启发,提出一种基于重力井曲面的变刚度摩擦摆支座,其曲面由内部的球面和外部的重力井曲面构成。首先,基于理论推导,建立其水平剪切方向的恢复力模型。其次,设计并制作了一个足尺变刚度摩擦摆支座试件,并对其进行拟静力试验,以进一步探究其滞回特性和力学性能。摩擦材料采用抗压性能优越的改性超高分子量聚乙烯。最终,通过数值模拟,比较研究重力井曲面摩擦摆支座和球形支座的动力特性。结果表明:变刚度双摩擦摆支座上下滑动面呈不对称滑动现象;改性超高分子量聚乙烯摩擦材料可以满足支座对摩擦垫局部应力大的需求。此外,与普通球形双摩擦摆支座相比,重力井曲面摩擦摆支座能够大幅减小地震动作下的内力需求,且具有与小半径球面摩擦摆支座相似的优越的自复位性能。

关键词:变刚度隔震支座;拟静力方法;重力井曲面摩擦摆支座;桥梁抗震

中图分类号:U447 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2025)05-0237-08

Gravity-well friction pendulum bearing and its seismic performance

CAO Sasa, ZHANG Feitao, ZHANG Liwen

(College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, P. R. China)

Abstract: Traditional bridges with isolation bearings have the problem of residual displacement of the isolator and the response of internal pier force during the impact of an strong earthquake or near-fault earthquake. This research suggests a variable-stiffness friction pendulum bearing based on a gravity-well surface, gaining inspiration from the facility for gravity-well surfaces in the science museum. Its surface is comprised of a gravity-well surface outside and a sphere inside. First, the theoretical derivation-based restoring force model in the horizontal shear direction is revealed. Second, a footprint variable stiffness friction pendulum bearing specimen is designed, constructed, and put through a cyclic shear test to further examine its mechanical and hysteresis characteristics. The friction material is a modified ultra-high molecular weight polyethylene with better compression resistance. In the end, numerical simulations are used to compare the dynamic properties of the gravity well friction pendulum bearing with the spherical bearing. The sliding surface of the variable stiffness double friction pendulum bearing is asymmetrical. The high local stress on the friction pad can be accommodated

收稿日期:2023-04-19

基金项目:国家自然科学基金(52178124);广东省自然科学基金(2022A1515011250)

作者简介:曹飒飒(1982-),男,博士,副教授,主要从事桥梁抗震研究,E-mail:cao@gzhu.edu.cn。

Received: 2023-04-19

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No.52178124); Natural Science Foundation of Guangdong Province (No.2022A1515011250)

Author brief: CAO Sasa (1982-), PhD, associate professor, main research interest: bridge seismic resistance, E-mail: cao@gzhu.edu.cn.

by the modified ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) friction material. The gravity-well friction pendulum bearing can also significantly reduce the internal force demand under the action of ground motion when compared to the conventional spherical double friction pendulum bearing, and it has the same superior self-reset performance as the small-radius spherical friction pendulum bearing.

Keywords: variable stiffness isolator; pseudo-static method; gravity-well friction pendulum bearing; bridge seismic

地震是一种破坏力极强的自然灾害,以波的形式传到地表而导致地面发生摇晃。桥梁作为重要的交通基础设施,很多学者对桥梁抗震进行了研究^[1-3]。传统的桥梁结构设计思路是采用“抗震”来应对地震作用,依靠结构的变形来吸收地震能量,但带来的结构或构件损伤无法避免。在遭遇大地震或者特大地震时,完全依靠结构或者构件的变形也无法完全吸收巨大的地震能量。而隔震技术通过设置隔震层,从而改变结构的振动周期,避开卓越周期,同时吸收和消耗主要地震能量,从而减小地震对主体结构的损害。

目前,应用较为广泛的是叠层橡胶支座和滑动摩擦支座^[4],叠层橡胶支座减隔震性能优越且稳定,但自复位能力差。传统双凹摩擦摆支座依靠其球形曲面赋予自身极强的自复位能力,但刚度随着变形的增加而增大,表明桥梁的下部结构内力会增大^[5-6]。

为了提高隔震桥梁在大震时的限位能力和恢复能力,许多学者将超弹性形状记忆合金材料(shape memory alloy, SMA)与隔震系统相结合,但SMA的引入会增大桥梁下部结构的内力响应。为了改善摩擦摆隔震系统在达到位移极限状态之前的自适应控制能力,庄鹏等^[7]提出了SMA拉索-复摩擦摆隔震支座。为了给支座提供稳定有效的限位能力,Fang等^[8]提出了一种新型形状记忆合金(SMA)索约束高阻尼橡胶支座,结果表明,SMA能够提供有效的约束且有良好的耗能能力,但同时引入SMA索会增大桥墩的受力。为满足不同地震水平的性能要求,Cao等^[9]提出了一种多级SAM铅芯橡胶支座,3组SMA索在特定的地震级别张紧,结果表明,该支座能有效地限制桥梁位移,但刚度也随着SMA索的激活而增大。为了避免摩擦摆系统恒定周期引起的共振问题,Han等^[10]提出了多变频摩擦摆支座,SMA索同样会加大内力响应。为了减小支座的内力响应,引入变刚度机制。Cao等^[11]提出了一种新型SMA负刚度支座,支座曲面改为外凸球形,外凸形状在位移增大时可以提供负刚度机制,减小SMA索增大的力,但同时也存在比较大的残余位移,且SMA索不能自由滑动。

为了减小桥梁的力,提出在隔震系统中采用变

刚度机制,即刚度随变形而变化,进而满足不同地震水平下的性能要求。主动或半主动控制组合隔震系统能提供比被动控制更好的性能,但在地震作用时会因断电而使该系统无法发挥作用。因此,被动变刚度隔震系统是一种较好的方案。

一种较常见的实现变刚度的方法是调整支座的形状。Fenz等^[12]首次提出三摩擦摆支座,由3个不同半径、摩擦系数相同的球面组成,但其刚度不连续,局限于3个值。Calvi等^[13]提出了可变摩擦摆支座,在摩擦摆支座的环区设置不同的摩擦系数,其刚度由一系列同心环调节。此外,还提出了其他一些可变曲面来替代球面^[14-16],包括六阶多项式函数、双曲线函数、指数函数等,这些隔震支座刚度呈连续变化,但其周期保持恒定。

针对隔震支座存在残余位移和内力响应大的问题,笔者提出一种新型变刚度重力井曲面摩擦摆支座,在重力和摩擦力共同作用下,通过调整支座的形状来实现变刚度,曲面由小半径球面和重力井曲面两段构成,在球面范围内可以自复位,重力井曲面范围内可以减小内力响应。

1 重力井曲面摩擦摆支座

1.1 设计原理

重力井曲面摩擦摆支座设计目的是:在中小震下,小半径内球面提供良好的自复位能力;在大震下,刚度逐渐变小的重力井曲面可减小支座结构的内力响应,从而实现变刚度机制。该新型支座主要由上下滑板、中间滑块以及安装在滑块上面的摩擦垫组成,如图1所示。上下滑板由小半径的内球面和具有变刚度特性的重力井曲面组成,借助重力与摩擦力的共同作用,小半径的内球面可提供自复位能力,重力井曲面提供可变刚度,以减小支座的内力。摩擦垫的作用是提供稳定的摩擦并使压力均匀分布,减小滑块局部受力。

1.2 工作机理

重力井曲面摩擦摆支座的中间滑块发生不对称滑动(即滑块在上下滑板的滑动位置不同步),可以延长上部结构的振动周期,滑块与上下滑板间摩擦耗散地震能量。该支座刚度随位移的增大呈连续变化,以满足不同地震水平的性能要求。

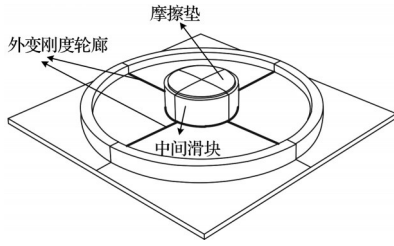


图1 重力井曲面摩擦摆支座构造图

Fig. 1 Construction of friction pendulum bearing with a gravity-well surface

若对支座上滑动板施加位移,支座滑动过程如图2所示,开始时滑块位于中心位置,支座的高度为 h (图2(a))。当 $x \leq d_s/2$ 时,滑块在内球面范围内滑动,支座高度也随之增加(图2(b))。在此范围内,滑块在重力与摩擦力共同作用下回到初始的中心位置,即支座在此范围内拥有自复位能力。当 $d_s/2 < x \leq d_s/2 + l_{\max}$ 时,滑块在上滑板发生滑动,而在下滑板没有发生滑动,滑块进入重力井曲面。此时支座的恢复力降低,达到减小支座受力的效果。当滑块接触到上滑动板内边缘时(如图2(c)),上滑动板停止滑动,滑动发生在下滑板的重力井曲面上,最后滑块到达下滑板内边缘时停止滑动(图2(d))。

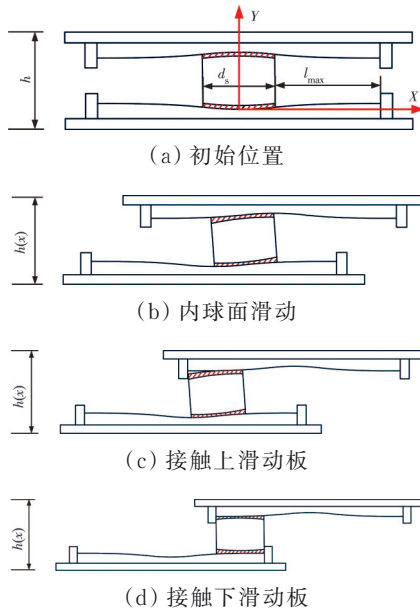


图2 支座工作机理

Fig. 2 Working mechanism of the isolator

1.3 恢复力模型

当 $d_s < x < 2l_{\max}$ 时,重力井曲面摩擦摆支座自由体力的分布如图3所示。其中, G 为上部结构传来的力, N 为滑板与摩擦垫之间的法向接触力, f 为滑板与摩擦垫之间的摩擦力, β 为摩擦力 f 与水平线之间的夹角, h_s 为滑块的高度。

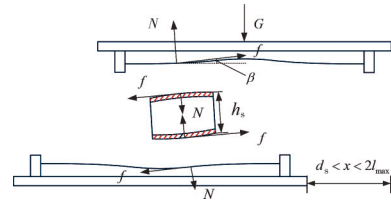


图3 支座隔离体受力分布图

Fig. 3 Stress distribution of the isolator

支座内球面的曲率半径为1 000 mm,外变刚度轮廓是重力井曲面,故支座单侧正向轮廓曲线表达式如下。

$$y = -\sqrt{R^2 - x^2} + a, x \leq \frac{d_s}{2} \quad (1)$$

$$y = -\frac{b}{x} + c, \frac{d_s}{2} < x \leq \frac{d_s}{2} + l_{\max} \quad (2)$$

式中: a 、 b 、 c 为常数,常数 a 由坐标系位置确定(图2(a)),另外,可通过内外轮廓交界处函数值与一阶导数值相等求得常数 b 、 c ; R 为球面曲率半径。

假设曲面轮廓函数 $y = f(x)$,摩擦力 f 与水平线之间的夹角

$$\beta = \arctan y' \quad (3)$$

支座的运动方程可写成^[17]

$$\frac{G}{g} \ddot{x} + F(x, \dot{x}) = -\frac{G}{g} \ddot{a} \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度; \ddot{a} 为地震动的水平加速度, $F(x, \dot{x})$ 为支座提供的恢复力。

$$F(x, \dot{x}) = N \sin \beta - f \cos \beta \quad (5)$$

摩擦力 f 与法向接触力 N 之间的关系为

$$f = \mu N \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (6)$$

式中: μ 为滑动摩擦系数; $\operatorname{sgn}(\dot{x})$ 为与速度相关的符号函数。

如图3所示,垂直方向的平衡方程可写成

$$\sum F_y = 0, G + f \sin \beta - N \cos \beta = 0 \quad (7)$$

将式(3)、式(6)、式(7)代入式(5)可得恢复力公式

$$F(x, \dot{x}) = \frac{G [\sin \beta - \mu \operatorname{sgn}(\dot{x}) \cos \beta]}{\cos \beta - \mu \operatorname{sgn}(\dot{x}) \sin \beta} \quad (8)$$

2 试验概况

2.1 试验装置

如图4所示,试验所采用试样尺寸为760 mm × 760 mm,中间滑块直径为200 mm,滑块上下面为外凸球面,预留5 mm深凹槽安装摩擦垫。支座法兰宽度为30 mm。

如图5所示,内球面轮廓长度为200 mm,变刚度轮廓长度为400 mm,球面曲率半径为1 000 mm。滑块、上下滑板均采用Q345钢材制作,摩擦垫采用

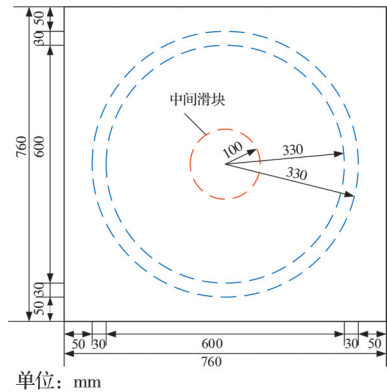


图 4 支座俯视图

Fig. 4 Vertical view of the isolator

改性超高分子量聚乙烯材料制作。为保证滑块稳定滑动,在滑块上、下部安装摩擦垫,并且在上、下滑动面涂抹硅油。

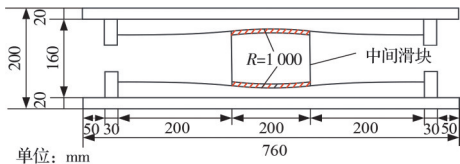


图 5 支座剖面图

Fig. 5 Cutaway view of the isolator

2.2 试验过程

采用静动态压剪试验机(YJW-20000)对重力井曲面摩擦摆支座进行拟静力试验。为避免滑板与加载设备之间发生滑动,在支座上下放置钢板,并通过预留螺栓孔连接。组装顺序如图 6 所示,依次将上钢板、支座试件、下钢板连接起来。

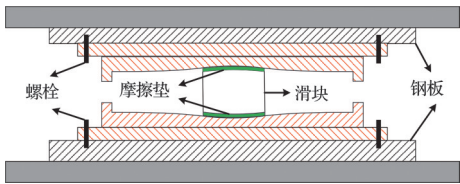


图 6 试验组装示意图

Fig. 6 Test device assembly diagram

试验现场试件的安装如图 7 所示,压剪试验机先对上板施加竖向荷载,接着通过位移控制底板横向循环加载。

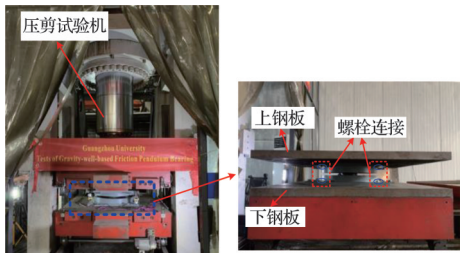


图 7 试验组装实物图

Fig. 7 Test device assembly photo

设置竖向压力 200 kN,最大加载位移 350 mm,从 0 逐级加载至 350 mm,增幅 50 mm,每次增幅循环加载 2 次,采用正弦波形式加载(如图 8 所示)。

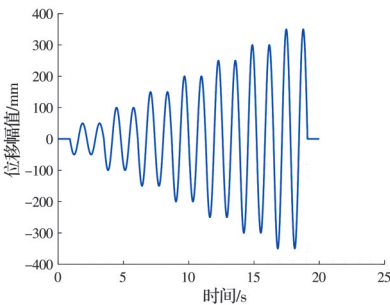


图 8 位移-时间加载曲线

Fig. 8 Displacement-time loading curve

3 数值模拟与对比分析

3.1 ABAQUS有限元模型

借助 ABAQUS 有限元分析软件,建立重力井曲面摩擦摆支座、球形摩擦摆支座的有限元模型,如图 9 所示,两者的区别在于外轮廓曲线不同。平板、曲面板、摩擦垫及中间滑块均采用 C3D8R 八节点六面体单元进行模拟,平板、曲面板、中间滑块均由钢材模拟,摩擦垫用橡胶材料模拟,材料参数见表 1。

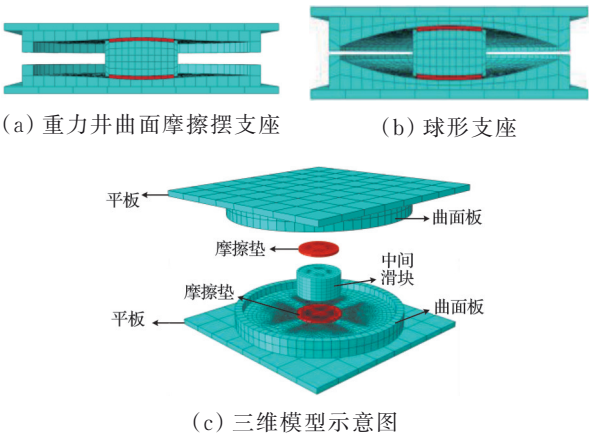


图 9 ABAQUS有限元模型

Fig. 9 ABAQUS finite element model

表 1 有限元模型的材料参数

Table 1 Material parameters of finite element model					
名称	密度/ (kg/m ³)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应力/ MPa	塑性应 变
钢材	7 850	210	0.30	355	0
摩擦垫	950	0.85	0.40	90	0

中间滑块上下各预留 5 mm 厚凹槽,用来安装摩擦垫,另外,为方便网格划分,将上下滑板分成平板和曲面板两部分。平板与曲面板间采用绑定约束类型,滑块与摩擦垫间采用绑定约束类型,摩擦

垫与上下滑动面间采用表面与表面接触(standard)类型,滑块与上下滑板侧面采用表面与表面接触(standard)类型。

上滑板($U_1=U_3=U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$, $U_2 \neq 0$),滑动过程中支座高度会增加,因此 U_2 方向允许移动。下滑板($U_1 \neq 0$, $U_2=U_3=U_{R1}=U_{R2}=U_{R3}=0$),对下滑板 U_1 方向施加水平位移荷载。 U_1 、 U_2 、 U_3 分别表示 X、Y、Z 三个方向的平动自由度, R_1 、 R_2 、 R_3 分别表示 X、Y、Z 三个方向的旋转自由度。

分析步共设置两步,第 1 步对上滑板施加 200 kN 集中力荷载,第 2 步对下滑板施加水平位移荷载,与试验工况相对应进行等效模拟分析。

3.2 参数分析

为探究支座参数对其性能的影响,从滑动面的摩擦系数、内球面曲率半径及内外轮廓交点位置 3 个方面进行分析,详细参数见表 2。

表 2 支座设计参数

Table 2 Design parameters of the isolators

组号	曲率半径/mm	摩擦系数	内外轮廓交点位置/mm
1	1 000	0.08	100
	1 000	0.08	150
	1 000	0.08	200
2	1 000	0.03	100
	1 000	0.04	100
	1 000	0.05	100
3	1 000	0.08	100
	2 000	0.08	100
	3 000	0.08	100

第 1 组支座仅内外轮廓交点位置不同,分别为 100、150、200 mm,如图 10 所示。

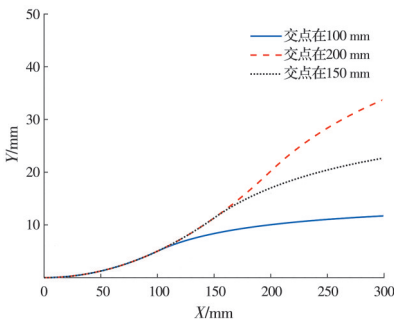


图 10 不同交点位置的轮廓曲线

Fig. 10 Outline curves of different intersection positions

第 2 组支座仅滑动面摩擦系数不同,分别为 0.03、0.04、0.05。第 3 组支座仅内球面曲率半径不同,分别为 1 000、2 000、3 000 mm,轮廓曲线如图 11 所示。以上模型均在竖向压力 200 kN、位移幅值 350 mm 下循环滞回加载。

由图 12 可以看出,交点在 100 mm 时,恢复力在

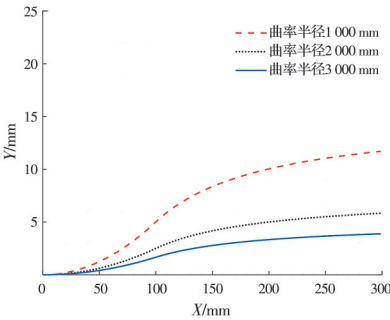


图 11 不同曲率半径的轮廓曲线

Fig. 11 Outline curves of different curvature radii

100 mm 左右呈减小趋势,在 250 mm 左右时滑块接触滑板边缘,造成恢复力激增;而交点在 150 mm 时,恢复力在 200 mm 左右开始减小,直到 320 mm 才接触到滑板边缘,恢复力出现小幅增加;交点在 200 mm 时,整个过程中重力井曲面摩擦摆支座刚度基本保持不变,与球形支座相似。由此可见,内外轮廓交点越靠近支座中心点,支座的变刚度特性越明显,同时减小支座内力响应的效果更好。

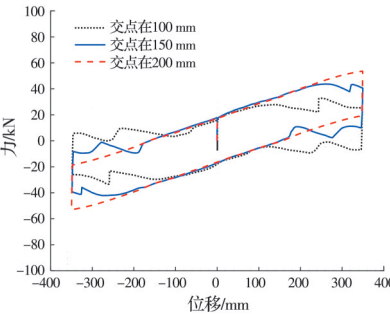


图 12 内外轮廓在不同交点位置的滞回曲线

Fig. 12 Hysteresis curves of the internal and external profiles at different intersection positions

对于分别采用摩擦系数 0.03、0.04、0.05 的重力井曲面摩擦摆支座,加载位移幅值为 350 mm 时,滞回曲线如图 13 所示。相同加、卸载循环下,耗能力随摩擦系数的增大而增大。摩擦系数越大,重力井曲面摩擦摆支座的静态残余位移越大。设计支座时,在条件允许的情况下,可以通过调整摩擦系数实现对支座的自复位能力优化。

由图 14 可以看出,与曲率半径 1 000 mm 的支座相比,曲率半径 2 000、3 000 mm 的支座整体剪力都较小,且在接触到滑板边缘时的刚度增长不明显。同时可以看到,曲率半径越小,卸载阶段静态残余越小。

通过上述分析可知,改变球面曲率半径是一种提高支座自复位能力的可靠方式,但摩擦系数过大也会影响支座的自复位能力;此外,内外轮廓交点位置在 100 mm 时,支座变刚度特性最佳且减小内力效果明显。

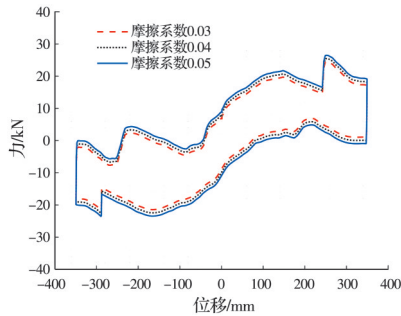


图 13 滑动面不同摩擦系数的滞回曲线

Fig. 13 Hysteresis curves of the sliding surface with different friction coefficients

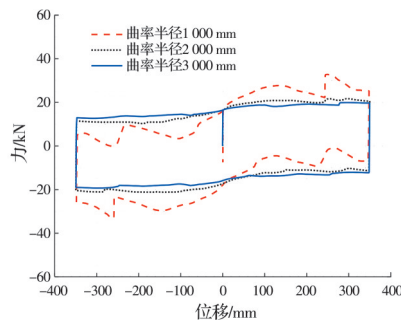


图 14 不同曲率半径的滞回曲线

Fig. 14 Hysteresis curves of different curvature radii

4 试验结果与对比分析

4.1 滞回曲线分析

由图 15 可以看出,试验与数值仿真结果的滞回曲线匹配度高(尤其在位移加载阶段)。在卸载阶段,两者存在一些差异,可能是在 ABAQUS 软件分析中滑块在变刚度曲面上发生应力集中所致。位移小于 100 mm 时,球形支座与重力井曲面摩擦摆支座恢复力基本保持一致;位移大于 100 mm 时,重力井曲面摩擦摆支座恢复力远小于球形支座,位移为 350 mm 时,恢复力减小 33 kN,表明重力井曲面摩擦摆支座减小内力响应的效果非常明显,符合支座的设计目的。

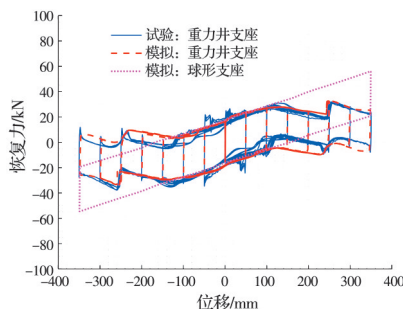


图 15 滞回曲线对比

Fig. 15 Comparison of hysteresis curves

试验所得滞回曲线表明,重力井曲面摩擦摆支座的静态残余位移过大,这是摩擦面的摩擦系数过大所致。由理论推导可知,支座处于零位移位置

时,水平摩擦力提供的恢复力 $f = \mu G$ 。根据试验所得零位移时支座的恢复力和竖向力,可计算出摩擦系数为 0.08。

4.2 摩擦垫受力分析

滑动过程中摩擦垫并不是全部保持贴合状态,会出现应力集中现象,图 16 显示了摩擦垫在不同加载位移下的应力分布情况,可以看到,摩擦垫承受的最大应力为 30 MPa,在摩擦材料的弹性范围(90 MPa)内,所以摩擦垫的应力集中不会影响支座的正常工作。

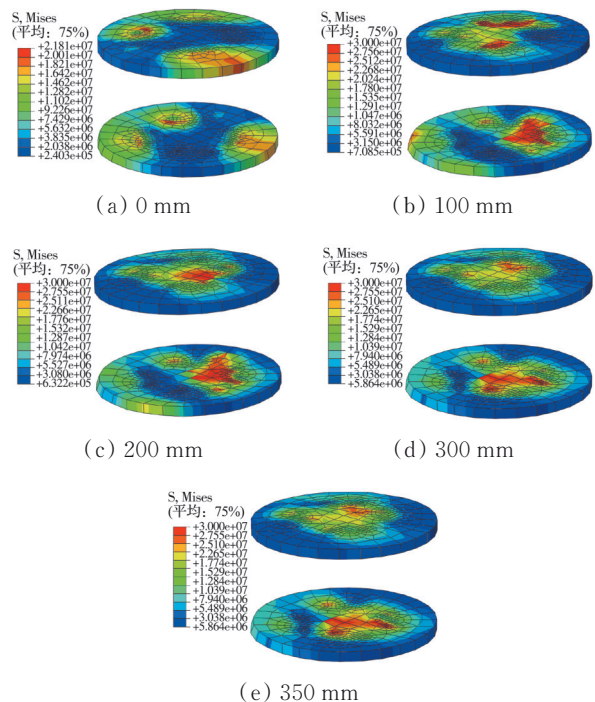


图 16 摩擦垫的应力云图

Fig. 16 Stress cloud diagram of the friction pad

试验结果表明,重力井曲面摩擦摆支座的滑块发生不对称滑动,与有限元模拟结果相匹配,如图 17 所示。滑动主要分为 6 个阶段:第 1 阶段,滑块在球形曲面对称滑动(即在上下滑动面同步滑动);第 2 阶段,滑块进入外变刚度曲面,滑动发生在下滑动面,直到滑块接触到下滑动板;第 3 阶段,滑块在上滑动面滑动,直到滑块接触上滑动板。卸载过程与加载过程相反。

4.3 支座减震性能分析

为了进一步分析支座的减震性能,绘制出支座的骨架曲线图、割线刚度图、耗散能量图及等效阻尼比图,如图 18 所示。其中割线刚度 K_s 由式(9)计算得到,等效阻尼比 ξ_{eq} 计算公式如式(10)所示,以水平恢复力-位移曲线上单个滞回环面积作为隔震装置消耗的能量 W 。

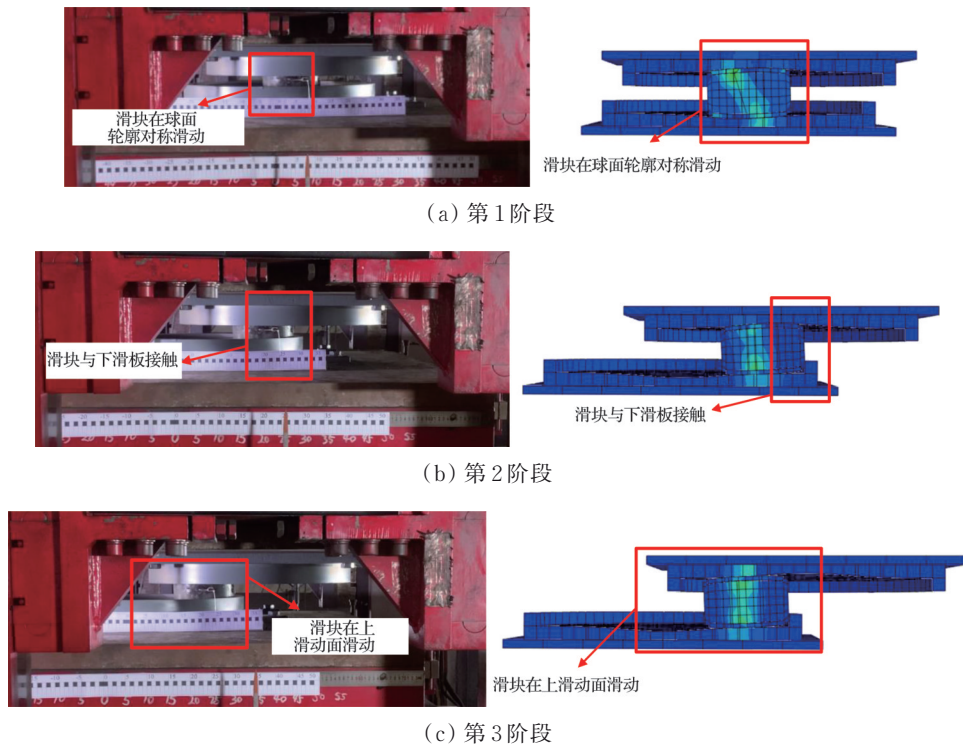


图17 支座加载时的滑动过程

Fig. 17 Sliding process of the isolator during loading

$$K_x = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (9)$$

式中: x_{\max} 、 x_{\min} 为加载幅值位移, 且 $x_{\max} > x_{\min}$, F_{\max} 、 F_{\min} 为位移为 x_{\max} 、 x_{\min} 时对应的恢复力。

$$\xi_{eq} = \frac{W}{2\pi K_x x^2} \quad (10)$$

式中: x 为加卸载循环的位移幅值。

由图18可以看出, 在重力与摩擦力的共同作用下, 位移幅值小于130 mm时, 恢复力呈增大趋势, 割线刚度随幅值的增大而减小。位移幅值大于

130 mm、小于250 mm时, 滑块进入下变刚度曲面, 恢复力呈减小趋势, 这是由于摩擦力与水平面夹角 β 变小, 法向接触力 N 与摩擦力 f 提供的恢复力减小 (由式(5)可以看出)。位移幅值为250 mm左右时, 恢复力激增, 割线刚度有所增大, 这是因为滑块运动到滑板边缘, 随后在上变刚度曲面滑动, 恢复力再次呈减小趋势。支座的耗散能量随着位移幅值的增大而近似呈直线增大。在这些位移幅值下, 等效阻尼比非常大, 位移幅值为50 mm时, 等效阻尼比达到60%, 大于50 mm时, 平均等效阻尼比为37%。

4.4 自复位能力

自复位能力是衡量隔震支座性能的一个重要指标, 为了具有良好的自恢复能力, 摩擦摆隔震支座的最大静态残余位移与最大加载位移之比应不大于0.5^[18]。试验表明, 在残余位移为84 mm时, 该支座最大加载位移可达到400 mm, 故最大静态残余位移与最大加载位移之比为0.21, 远小于0.5。

5 结论

提出了一种基于重力井曲面的摩擦摆支座。其曲面轮廓由两部分组成: 内部小半径的球面和外部重力井曲面。拟静力试验和数值模拟结果表明:

1) 重力井曲面摩擦摆支座呈不对称滑动, 即滑块先在一个滑动面完成滑动过程, 继而在另外一个滑动面发生滑动, 这与传统球形摩擦摆支座不同。

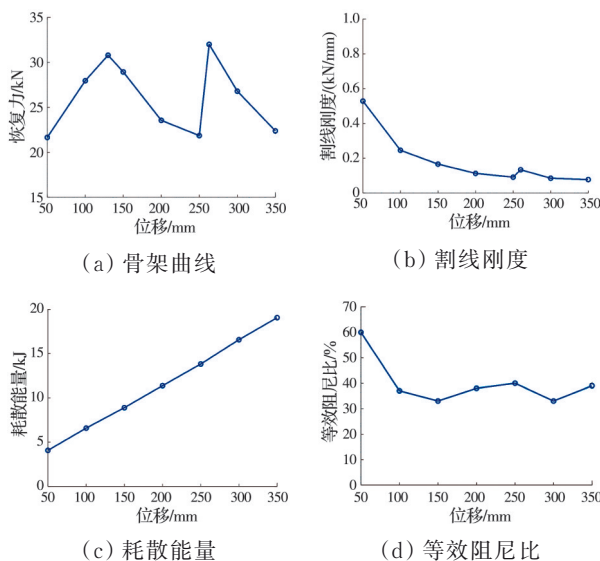


图18 支座减震性能分析

Fig. 18 Seismic performance analysis of the isolator

2)与传统球形摩擦摆支座相比,该支座变刚度特性非常明显,不仅能够大幅减小下部结构的力,而且自复位能力也较好。

3)改变球面曲率半径是提高支座自复位能力的可靠方式,但摩擦系数过大也会影响支座的自复位能力,应针对减小摩擦系数开展进一步研究。

参考文献

- [1] 赵灿晖,贾宏宇,岳伟勤,等.桥梁抗震2020年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,43(增刊1): 91-99.
ZHAO C H, JIA H Y, YUE W Q, et al. State-of-the-art review of seismic design of bridge in 2020 [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(Sup 1): 91-99. (in Chinese)
- [2] 赵桂峰,何昊,马玉宏,等.旋转质量摩擦阻尼器限位摩擦摆隔震桥梁地震响应分析[J].土木工程学报,2023,56(2): 46-57.
ZHAO G F, HE H, MA Y H, et al. Seismic response analysis of bridges isolated by friction pendulum with rotating mass damper [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(2): 46-57. (in Chinese)
- [3] 王宝夫,韩强,杜修力.滑动摩擦支座隔震桥梁地震反应分析[J].土木工程学报,2016,49(增刊2): 85-90.
WANG B F, HAN Q, DU X L. Seismic response analysis of isolated bridge with friction pendulum bearings [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(Sup 2): 85-90. (in Chinese)
- [4] TSOPELAS P, CONSTANTINOU M C, OKAMOTO S, et al. Experimental study of bridge seismic sliding isolation systems [J]. Engineering Structures, 1996, 18(4): 301-310.
- [5] 魏标,刘义伟,蒋丽忠,等.地震作用下双曲面球型减隔震支座在铁路简支梁桥中的动力行为[J].土木工程学报,2019,52(6): 110-118.
WEI B, LIU Y W, JIANG L Z, et al. Dynamic behaviors of double spherical isolation bearing in simply-supported railway bridges under earthquakes [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(6): 110-118. (in Chinese)
- [6] 胡章亮,魏标,蒋丽忠,等.高速铁路梁桥建模参数敏感性分析[J].铁道科学与工程学报,2023,20(2): 393-404.
HU Z L, WEI B, JIANG L Z, et al. Sensitivity analysis of modeling parameters of high-speed railway girder bridges [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(2): 393-404. (in Chinese)
- [7] 庄鹏,孙仕琦,韩森.SMA拉索-复摩擦摆隔震支座性能试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(增刊2): 482-489.
ZHUANG P, SUN S Q, HAN M. Performance experiment of SMA cable-double friction pendulum isolation bearing [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(Sup 2): 482-489. (in Chinese)
- [8] FANG C, LIANG D, ZHENG Y E, et al. Seismic performance of bridges with novel SMA cable-restrained high damping rubber bearings against near-fault ground motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2022, 51(1): 44-65.
- [9] CAO S S, OZBULUT O E, SHI F, et al. Experimental and numerical investigations on hysteretic response of a multi-level SMA/lead rubber bearing seismic isolation system [J]. Smart Materials and Structures, 2022, 31(3): 035024.
- [10] HAN Q A, LIANG X, WEN J N, et al. Multiple-variable frequency pendulum isolator with high-performance materials [J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(7): 075002.
- [11] CAO S S, OZBULUT O E, SHI F, et al. An SMA cable-based negative stiffness seismic isolator: Development, experimental characterization, and numerical modeling [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2022, 33(14): 1819-1833.
- [12] FENZ D M, CONSTANTINOU M C. Modeling triple friction pendulum bearings for response-history analysis [J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(4): 1011-1028.
- [13] CALVI P M, MORATTI M, CALVI G M. Seismic isolation devices based on sliding between surfaces with variable friction coefficient [J]. Earthquake Spectra, 2016, 32(4): 2291-2315.
- [14] LU L Y, HUANG H W, WU Y, et al. Theory and experimental verification of a double sliding isolator with variable curvature [J]. Engineering Structures, 2021, 238: 112265.
- [15] LU L Y, LEE T Y, YEH S W. Theory and experimental study for sliding isolators with variable curvature [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2011, 40(14): 1609-1627.
- [16] TSAI C S, CHIANG T C, CHEN B J. Finite element formulations and theoretical study for variable curvature friction pendulum system [J]. Engineering Structures, 2003, 25(14): 1719-1730.
- [17] IEMURA H, IGARASHI A, TOYOOKA A, et al. Seismic response control with innovative negative stiffness dampers [C]// The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- [18] PONZO F C, DI CESARE A, LECCESE G, et al. Shake table testing on restoring capability of double concave friction pendulum seismic isolation systems [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(14): 2337-2353.