

文章编号: 1674-599X(2021)02-0061-07

刚性滑板-复位橡胶隔震支座性能研究

李林珊¹, 白羽¹, 周立超¹, 赖正聪¹, 张田庆²

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 中国建筑第二工程局有限公司, 云南 昆明 650501)

摘 要: 为研发一种自复位功能的刚性滑板-复位橡胶隔震支座, 对支座刚性承压滑移元件摩擦特性、免承压复位橡胶块剪切特性和整体支座的力学性能进行了试验研究, 并采用 ABAQUS 有限元模型分析了整体支座的力学特性。研究表明: 刚性承压滑移元件动摩擦系数在 0.020~0.027 之间、免承压复位橡胶元件的水平等效刚度为 129.33 kN/m; 刚性滑板-复位橡胶隔震支座的塑性变形能力较强, 具有很好的耗能性, 该支座在小剪切位移下, 会是一种稳定性良好的隔震支座。

关键词: 复位橡胶; 摩擦系数; 恢复力模型

中图分类号: TU352

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.010

Study on performance of rigid sliding plate-reset rubber isolation bearing

LI Lin-shan¹, BAI Yu¹, ZHOU Li-chao¹, LAI Zheng-cong¹, ZHANG Tian-qing²

(1. School of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. China Construction Second Engineering Bureau Co., Ltd., Kunming 650501, China)

Abstract: In order to develop a rigid sliding plate-reset rubber isolation bearing, the friction characteristics of the rigid bearing sliding element, the shear characteristic of the pressure-free reset rubber block and the mechanical properties of the whole bearing were studied. The mechanical properties of the whole bearing were also analyzed using the ABAQUS finite element model. The results show that, the dynamic friction coefficient of the rigid pressure-bearing sliding element is changing from 0.020 to 0.027, and the horizontal equivalent stiffness of the pressure-free reset rubber element is 129.33 kN/m. The rigid sliding plate-reset rubber bearing has strong plastic deformation ability and satisfactory energy dissipation ability. Which is considered as a kind of perfect stability isolation bearing under small shear displacement.

Key words: reset rubber; coefficient of friction; force restoring model

隔震指在上部结构与基础之间, 通过增设隔震装置, 形成“柔软”隔震层, 对地震能量进行有效隔离和耗散, 可降低结构地震作用, 提升其抗震性能的一种方法。常用的隔震装置有钢板叠层橡胶支座、摩擦滑移隔震支座、滚动(轴)隔震支座等。其中, 钢板叠层橡胶支座是当前应用最为广泛的一种支座, 分为有铅芯和无铅芯 2 种, 摩擦滑移隔震支座主要有弹性滑板支座(elastic slide bearing, 简称

为 ESB)和滑移摩擦摆(friction pendulum sliding, 简称为 FPS), 这 2 种摩擦型支座均具有较小的水平刚度和显著的摩擦耗能特性, 受到广泛应用。由于 ESB 不具备自复位能力, 常采取橡胶支座与 ESB 联合布置的方式。强震作用下, 叠层橡胶支座需同时承受上部结构竖向压力和较大水平剪力, 产生较大的剪切变形。当剪切变形过大时, 在竖向压力作用下橡胶支座可能发生失稳, 导致隔震层失效, 甚

收稿日期: 2020-10-16

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(2020J0061)

作者简介: 李林珊(1994-), 女, 昆明理工大学硕士生。

至上部结构倾覆倒塌。FPS 因独特的曲面凹盆构造, 结构在震后因自重作用滑移复位至初始最低点(曲盆中心)。当不规则隔震结构在地震作用下产生扭转位移时, 由于外边缘 FPS 滑块运动至曲盆高处, 可能导致隔震层中间部位的 FPS 产生提离现象^[1]。

根据 Haringx^[2-3]提出的关于橡胶弹性体压缩剪切计算理论, 作者拟研发一种具有自复位功能的刚性滑板-复位橡胶隔震支座, 并对支座刚性承压滑移元件摩擦特性、免承压复位橡胶块剪切特性和整体支座的力学性能进行了试验研究, 并采用 ABAQUS 有限元模型分析了整体支座的力学特性。

1 刚性滑板-复位橡胶隔震支座构造

刚性滑板-复位橡胶隔震支座主要由刚性承压滑移元件和免承压复位橡胶块并联组合而成。在钢板底面中心位置设有嵌槽, 安装改性聚四氟乙烯 (poly tetra fluoroethylene, 简称为 PTFE) 板。PTFE 板上为钢柱, 钢柱是支座的支承构件, 承受上部结构的全部荷载, PTFE 板相接触的支座下方钢板为不锈钢板, 接触面进行了特殊抛光处理, 以降低其粗糙度。天然橡胶块与上、下钢板间加入硫化钢板, 采用硫化工艺将二者粘接为一体。然后使用 36 套 8.8S 级 M80 高强螺栓把刚性承压滑移元件与复位橡胶块加强连接, 如图 1 所示。橡胶和钢板在硫化成型之前进行了表面防腐耐磨处理, 以提高其耐久性^[4]。每组试件由 2 块钢板、1 块钢柱、36 块 8.8S 级 M80 螺栓、复位橡胶、硫化链接钢板组成, 如图 2 所示。

免承压复位橡胶块在支座中, 仅提供水平恢复力, 不承受竖向压力。试验过程中, 采用 2 块橡胶

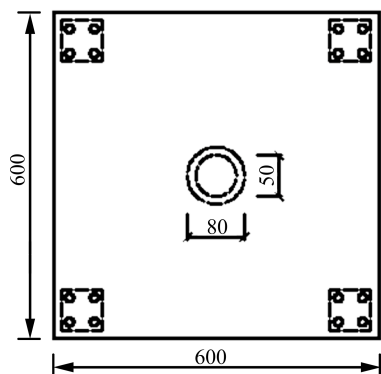


图 1 4 块复位橡胶支座 (单位: mm)

Fig. 1 4 pieces of reset rubber bearing (unit: mm)

做实验, 发现稳定性较小, 所以选择 4 块方形橡胶, 尺寸为 95 mm×95 mm×100 mm。

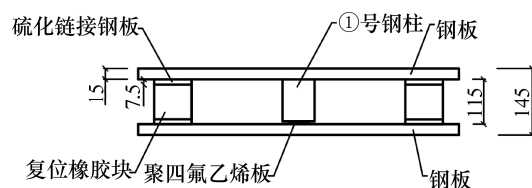


图 2 支座组成 (单位: mm)

Fig. 2 Composition of bearing (unit: mm)

2 恢复力模型

2.1 刚性承压滑移元件恢复力模型

刚性滑板-复位橡胶隔震支座中的刚性承压滑移元件嵌固改性 PTFE 板, 与抛光镜面不锈钢板相接触, 滑动时通过库伦摩擦力消耗能量。刚性承压滑移元件本身不具有复位能力, 运动也无明确周期, 可采用理想刚塑性模型表示其恢复力特性, 刚性承压滑移元件理论恢复力模型如图 3 所示。滑板处于静止状态时, 其水平刚度近似为无限大; 滑板处于滑动状态时, 其水平刚度近似为 0。滑动面上的水平摩擦力计算式为:

$$F = -\mu N \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (1)$$

$$\operatorname{sgn}(\dot{x}) = \begin{cases} 1 & \dot{x} > 0; \\ 0 & \dot{x} = 0; \\ -1 & \dot{x} < 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ 为刚性滑块元件的动摩擦系数; N 为支座的竖向压力; $\operatorname{sgn}(\dot{x})$ 为符号函数; $\dot{x}$ 为滑动速度。

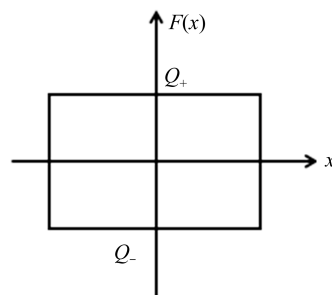


图 3 刚性承压滑移元件的恢复力模型

Fig. 3 Restoring force model of rigid bearing sliding element

在试验过程中, 施加竖向荷载, 测得最大、最小摩擦力, 代入式(3), 计算得出刚性滑块元件的动摩擦系数:

$$\mu = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{2P_v} \quad (3)$$

式中: $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$ 分别为最大、最小摩擦力; P_v 为试验施加的竖向荷载。

2.2 免承压复位橡胶块恢复力模型

刚性滑板-位橡胶隔震支座的免承压复位橡胶块内部为纯橡胶材料, 其水平刚度随着水平剪力的增加而增加, 可使用线弹性模型表示其恢复力特性, 如图 4 所示。在设计变形范围内, 其水平刚度基本为常数。其水平恢复力 F 为:

$$F = K_h x。$$
 (4)

式中: K_h 为复位橡胶元件的弹性刚度; x 为支座的水平位移。

通过试验, 测得最大、最小的水平剪力及二者对应的水平位移, 然后代入式(5)计算复位橡胶元件的水平等效刚度:

$$K_h = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{X_1 - X_2}。$$
 (5)

式中: K_h 为水平等效刚度; $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$ 分别为最大、最小水平剪力; X_1 、 X_2 分别为最大、最小水平位移。

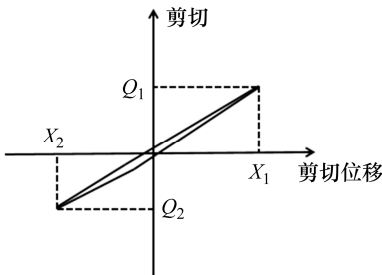


图 4 复位橡胶块的恢复力模型

Fig. 4 Force restoring model of reset rubber block

2.3 刚性滑板-复位橡胶隔震支座恢复力模型

刚性滑板-复位橡胶隔震支座刚性承压滑移元件与免承压复位橡胶块整体的恢复力叠加后, 将图形简化, 可得出整体支座的恢复力模型如图 5 所示。

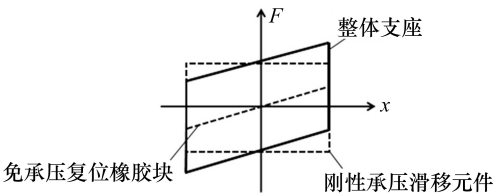


图 5 整体支座的恢复力模型

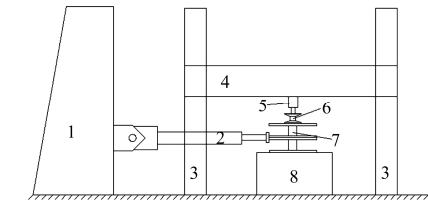
Fig. 5 Force restoring model of integral bearing

3 试验研究

3.1 试验加载设备

本次试验使用伺服直线作动器作为加载设备,

最大输出荷载为 250 kN, 还包括油压千斤顶、力传感器、信号采集系统等其他设备。伺服直线作动器的一端固定于反力墙上, 另一端与试件通过焊接连接, 试验装置如图 6 所示。



1—反力墙; 2—伺服作动器; 3—反力架;
4—反力梁; 5—油压千斤顶; 6—力传感器;
7—试验支座; 8—支墩

图 6 试验装置示意

Fig. 6 Schematic diagram of test apparatus

3.2 试验方案

采用双剪法对试件进行压剪试验。每组试验工况设定的 3 次水平位移分别为 10,20,30 mm。试验时, 将试件固定安置在支墩上。使用油压千斤顶对其进行竖向加载, 并通过试件上方的力传感器设定竖向荷载。通过计算机控制的水平伺服直线作动器对试件进行水平加载。通过试验设备配套的信号采集系统, 记录试件的水平位移、荷载时程数据。每个工况采用正弦简谐波水平往复加载 3 次循环, 加载频率为 0.05 Hz。使用第 3 次循环的测试值作为测定值, 计算试件的性能参数。试验共进行 13 个工况, 见表 1。

表 1 试验工况表

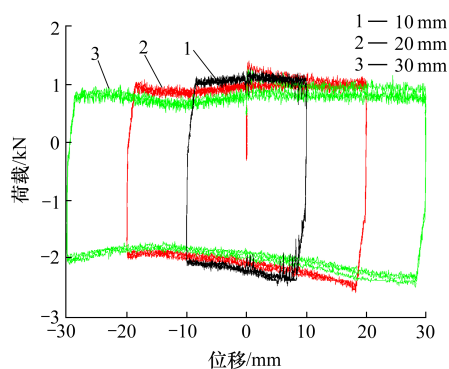
Table 1 Test conditions

工况	试件	摩擦材料	竖向荷载/MPa
1	刚性滑块元件	未添加润滑剂改性 PTFE 板 (A 类)	10
2			15
3			20
4		添加润滑剂改性 PTFE 板(B 类)	10
5			15
6			20
7	支座整体	未添加润滑剂改性 PTFE 板 (A 类)	10
8			15
9			20
10		添加润滑剂改性 PTFE 板(B 类)	10
11			15
12			20
13	复位橡胶元件		0

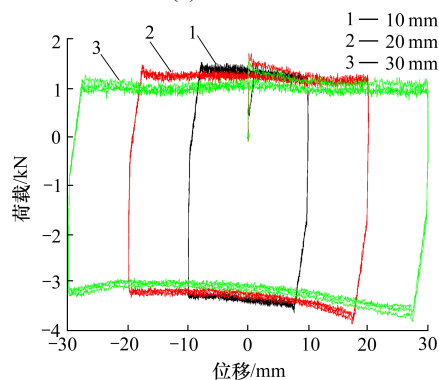
3.3 试验结果及分析

3.3.1 刚性承压滑移元件

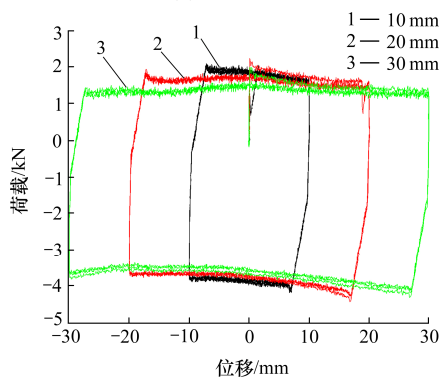
刚性滑块元件在不同竖向荷载作用下, 得到的滞回曲线如图 7、8 所示。



(a) 10 MPa



(b) 15 MPa



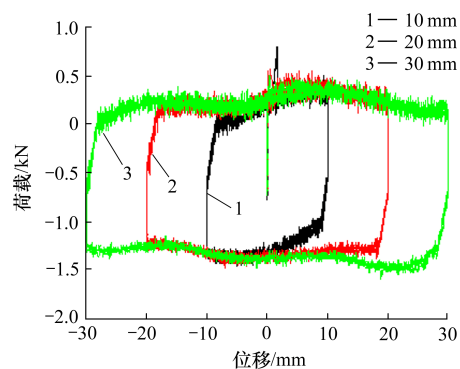
(c) 20 MPa

图 7 A 类刚性承压滑移元件在不同竖向荷载下的滞回曲线
Fig. 7 Hysteretic curve of class A rigid sliding element under different vertical load

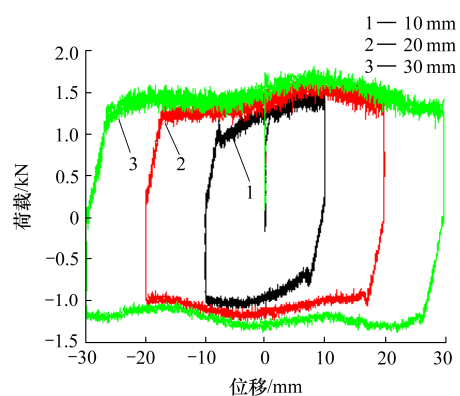
提取第 3 圈循环的试验数据,通过式(3)计算得到各工况下刚性滑块元件的动摩擦系数。刚性滑块元件在不同竖向荷载和滑动位移下,得到动摩擦系数不完全相等。A 类刚性滑块元件的动摩擦系数为 0.022~0.027,平均值为 0.025;B 类刚性滑块元件动摩擦系数为 0.020~0.025,平均值为 0.022,并且动摩擦系数随着竖向荷载的增大而减小。

3.3.2 复位橡胶元件

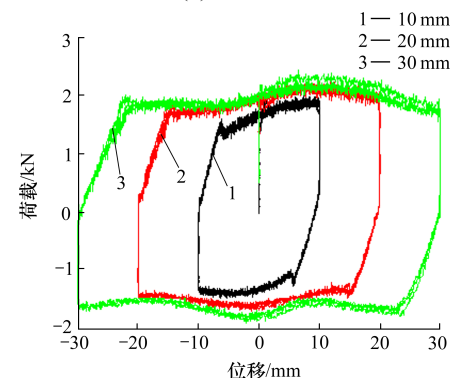
支座装配 4 组复位橡胶块进行有效滑移,在 0 MPa 竖向压力作用下,其复位橡胶体支座的滞回曲线如图 9 所示。



(a) 10 MPa



(b) 15 MPa



(c) 20 MPa

图 8 B 类刚性承压滑移元件在不同竖向荷载下的滞回曲线
Fig. 8 Hysteretic curve of class B rigid bearing sliding element under different horizontal load

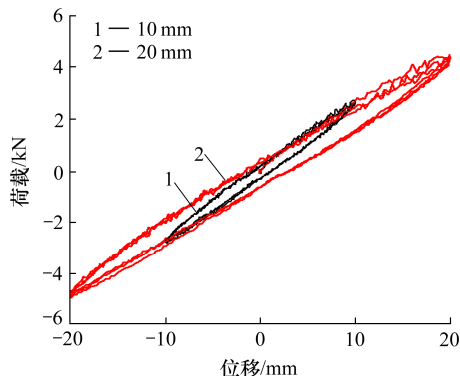


图 9 橡胶支座 0 MPa 下的滞回曲线

Fig. 9 Hysteretic curve of rubber bearing without stress

通过式(5)计算复位橡胶元件的水平等效刚度, 得到位移 10 mm 的水平刚度为 139.89 kN/m, 位移 20 mm 的水平刚度为 118.77 kN/m, 两者的平均值为 129.33 kN/m。支座水平等效刚度是衡量铅芯叠层橡胶隔震支座力学性能的重要参数。一定范围内, 支座的水平等效刚度越大, 相同的地震作用下支座上、下板产生的相对位移值越小, 支座的水平变形较小且更容易自动复位^[9]。

从图 9 中可以看出, 复位橡胶体在无竖向荷载作用下, 滞回曲线与理论恢复力模型基本吻合, 水平位移为 ± 10 mm、 ± 20 mm 时, 耗能稳定且重合度高, 耗能衰减量非常小。

3.3.3 整体支座

6 种工况下, 试件支座装配 4 块橡胶块刚性滑板-复位橡胶隔震支座进行有效滑移时其支座的滞回曲线如图 10、11 所示。

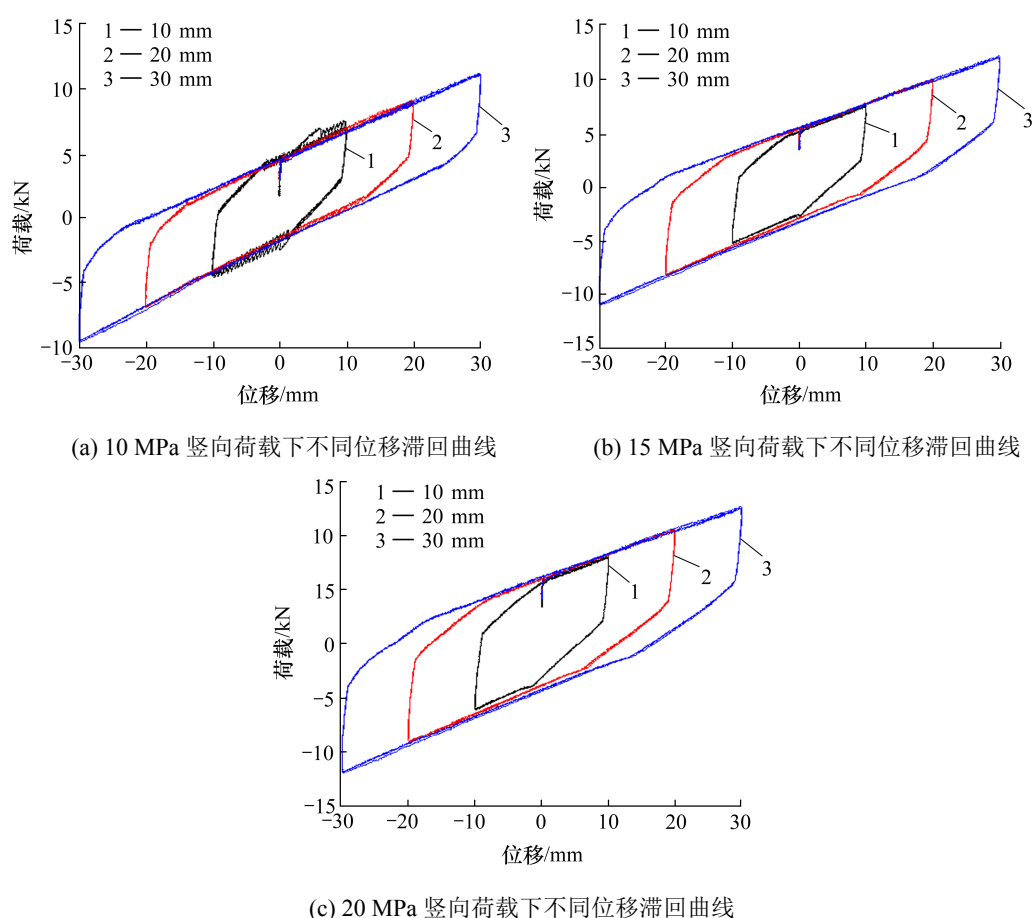


图 10 A 类支座滞回曲线

Fig. 10 Hysteretic curve of class A bearing

从图 10、11 可以看出, 在 A 类和 B 类中, 10 MPa 初始竖向压力作用下的滞回曲线相对 15 MPa、20 MPa 作用下的较不稳定; 滞回曲线随着竖向压力增大, 重叠率逐渐增加; 支座滞回曲线接近平行四边形。表明: 支座塑性变形能力很强, 具有很好的抗震性能和耗能能力, 在规定的荷载和水平剪切位移下, 其耗能相对稳定。

该支座将 2 种不同的隔震支座采用并联的方式组成隔震系统。复合隔震体系能充分运用不同隔震技术的特性, 兼具多种隔震技术的优点, 其隔震效

果优于单一隔震装置。不仅具有良好的竖向承载力、水平恢复力, 而且从支座滞回曲线可以看出接近理论恢复力模型, 整体支座的塑性变形能力很强, 具有很好的抗震性能和耗能性。

4 数值模拟分析

4.1 分析模型建立

模拟橡胶的超弹性本构模型有 Ogden 模型、Neo-Hookean 模型、Yeoh 模型、Reduce Polynomial

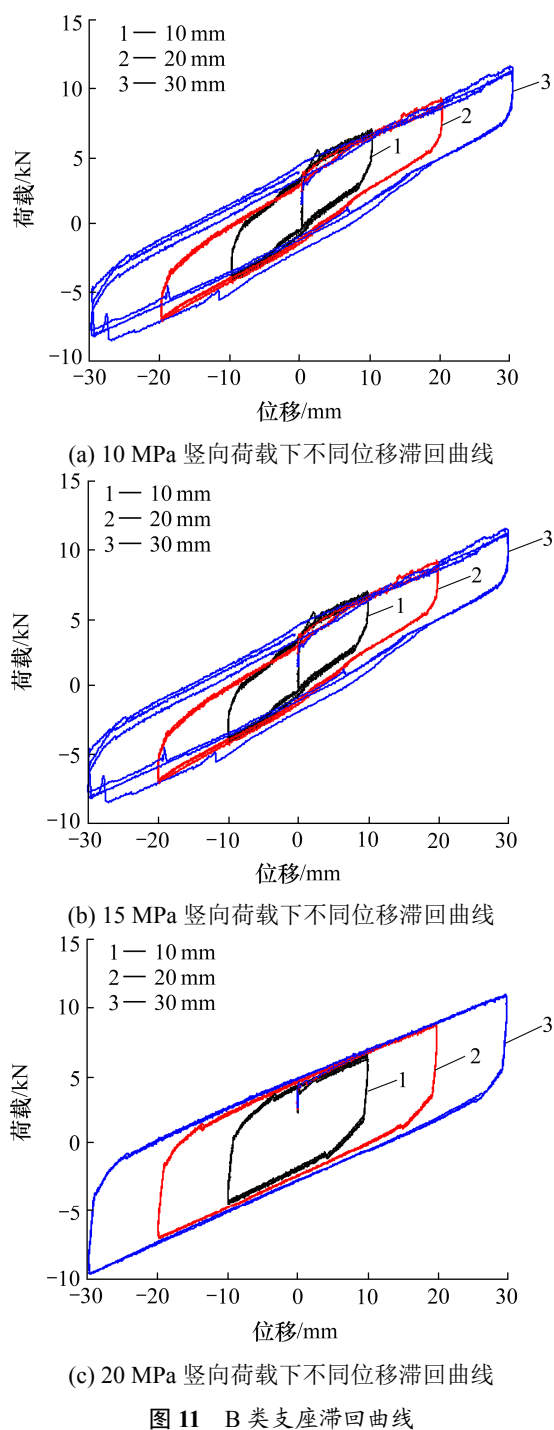


Fig. 11 Hysteretic curve of class B bearing

模型及 Mooney-Rivlin 模型等^[10]。本研究使用 ABAQUS 有限元软件对刚性滑板-复位橡胶隔震支座进行建模分析,模型中复合橡胶材料采用 Mooney-Rivlin 模型定义其本构关系,定义不可压缩常数 $D_1=0$; Q235 上、下钢板及中间摩擦板均定义为弹性材料,其材料参数设置为杨氏模量 $E=206\ 000\ \text{MPa}$,泊松比 $\mu=0.3$;中间 PTFE 也定义为弹性材料,其材料参数设置为杨氏模量 $E=280\ 000$

MPa,泊松比 $\mu=0.5$ 。网格的划分在有限元分析中比较重要,单元类型、网格划分技术及划分网格数目和质量都会对模拟计算精度产生影响^[11]。本模型中,上、下钢板和钢柱采用 C3D8R,聚四氟乙烯板单元类型采用 C3D8,橡胶单元类型采用 C3D8RH,如图 12 所示。

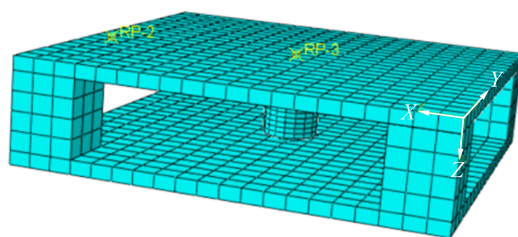


图 12 支座网格划分有限元模型

Fig. 12 Mesh partition finite element model of bearing

模型边界条件设置为下钢板平面完全固定,上钢板设置为 Z 方向完全固定,X-Y 平面可以自由运动,X-Y-Z 坐标如图 12 所示。上钢板提供竖向压力,螺栓采用竖向压力加载方式,钢板采用位移加载方式,方向为 X 向,幅值为 $\pm 20\ \text{mm}$,加载一个循环。模型加载如图 13 所示。

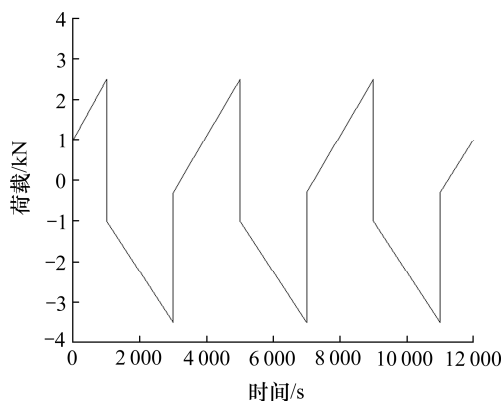


图 13 模拟试验加载

Fig. 13 Loading of simulated test

4.2 整体支座试验结果与模拟值对比分析

利用该耗能隔震支座的恢复力与位移建立恢复力模型。在竖向荷载分别为 15 MPa、20 MPa,水平位移 $\pm 20\ \text{mm}$ 下的耗能曲线如图 14 所示。

支座的试验滞回曲线与 1~4 圈耗能滞回曲线平均刚度模拟值进行对比,表明:试验结果与模拟值两者相差不大,滞回曲线接近平行四边形。整个支座的塑性变形能力很强,具有很好的抗震性能和耗能性。刚性滑板-免承压复位橡胶隔震支座在小

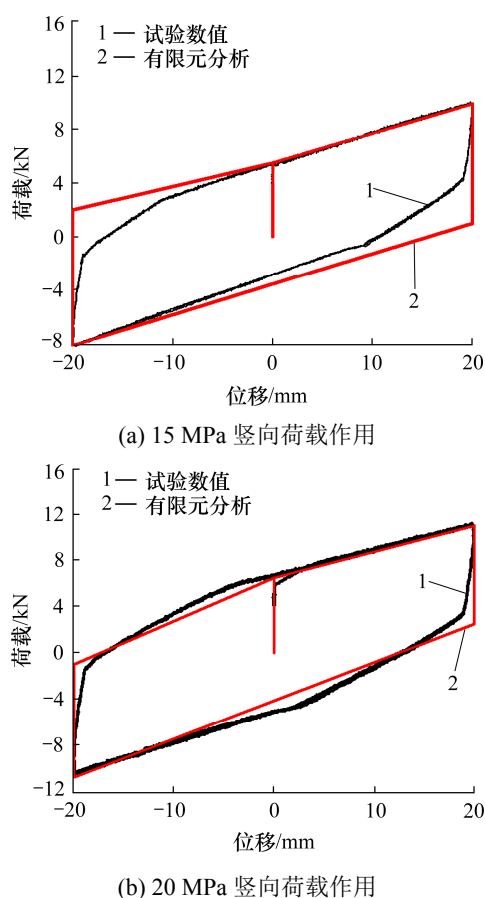


图14 试验与模拟结果对比

Fig. 14 Comparison of test and simulation results

剪切位移下,是一种稳定性较好的隔震支座。

5 结论

对支座刚性承压滑移元件的摩擦特性、免承压复位橡胶块剪切特性和整体支座的基本力学性能进行了试验研究,采用 ABAQUS 建立了有限元模型,并对整体支座进行模拟分析。得出结论为:

1) 刚性滑板-复位橡胶隔震支座中的刚性承压滑移元件、复位橡胶元件以及整体支座的水平荷载-位移(变形)滞回曲线与理论恢复力模型吻合。

2) 刚性滑板-复位橡胶隔震支座在设计极限竖向荷载作用下,没有发生明显变形。表明:刚性承压滑移元件竖向刚度较大,具有良好竖向承载力。

3) ABAQUS 模拟与实验吻合良好,刚性滑板-复位橡胶隔震支座在小剪切位移下,是一种稳定性较好的隔震支座。

参考文献(References):

[1] 葛楠,苏幼坡,王兴国,等.竖向刚度对 FPS 滑移摩擦摆系

统隔震性能影响研究[J].工程抗震与加固改造,2010,32(4):20-25,37.(GE Nan,SU You-po,WANG Xing-guo, et al. Disturbance from vertical oscillation to seismic isolation behavior of FPS system[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(4): 20-25, 37. (in Chinese))

[2] Haringx J A. On highly compressive helical springs and rubber rods and their applications for vibration-free mountings, I[J]. Philips Research Report, 1948: 401-449.

[3] Haringx J A. On highly compressive helical springs and rubber rods and their applications for vibration-free mountings, II[J]. Philips Research Report, 1949: 49-80.

[4] 江陈,白羽,和磊,等.钢板橡胶复合耗能器试验研究[J].工程抗震与加固改造,2019,41(3):92-97,91.(JIANG Chen, BAI Yu, HE Lei, et al. Experimental study on the metal rubber composite damper[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2019, 41(3): 92-97, 91. (in Chinese))

[5] 中国工程协会焊接学会.焊接手册第三版[M].北京:机械工业出版社,2014.(Welding Society of China Engineering Association. Welding manual, 3rd edition[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2014. (in Chinese))

[6] 张彬,庄国华,曾向荣.橡胶减振器蠕变的试验研究[J].噪声与振动控制,2008,28(4):56-59.(ZHANG Bin, ZHUANG Guo-hua, ZENG Xiang-rong. Test study on creep of rubber isolators[J]. Noise and Vibration Control, 2008, 28(4): 56-59. (in Chinese))

[7] 广州大学工程抗震研究中心.GB/T 20688.1—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.(Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University. GB/T 20688.1—2007, Rubber bearings-Part 1: Seismic-protection isolators test methods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (in Chinese))

[8] 广州大学工程抗震研究中心.GB 20688.3—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,2007.(Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University. GB 20688.3—2006, Rubber Bearing-Part 3: Elastomeric seismic-protection isolators for buildings[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (in Chinese))

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011—2010,建筑抗震设计规范 [S]. 北京:中国建筑业出版社,2010.(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50011—2010, Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))

[10] 左亮,肖绯雄.橡胶 Mooney-Rivlin 模型材料系数的一种确定方法[J].机械制造,2008,46(7):38-40.(ZUO Liang, XIAO Fei-xiong. A method for determining material coefficients of Mooney-Rivlin model of rubber[J]. Machinery, 2008, 46(7): 38-40. (in Chinese))

[11] 杜聪.基于 ABAQUS 强度折减法的边坡稳定性分析[J].交通科学与工程,2018,34(2):31-34,90.(DU Cong. Analysis of slope stability by strength reduction FEM based on ABAQUS[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(2): 31-34, 90. (in Chinese))