

罗楚雄.小型叠层橡胶支座的力学性能相关性[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(2):41-47. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.02.006

LUO C X. On Correlation of Mechanical Properties of Small Laminated Rubber Bearings[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(2):41-47. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.02.006

小型叠层橡胶支座的力学性能相关性

罗楚雄*

(中国航空规划设计研究总院有限公司,北京 100032)

摘要:由于振动台使用的小型橡胶支座的尺寸并非同比例缩尺,与 GB/T 20688.3—2006 中的支座规格相差较远,需对其力学性能进行试验研究.文章对 6 个小型叠层橡胶支座的压缩和剪切性能进行研究,结果表明:GB/T 20688.3—2006 中关于叠层橡胶支座竖向压缩刚度的计算方法不适用于小型缩尺橡胶支座,而剪切刚度的计算方法具有一定的参考性.因此,在振动台隔震试验前需对支座刚度进行测验,选取刚度较为接近的支座进行后续试验.压缩刚度的离散性造成的不均匀沉降极小,应优先考虑实测剪切刚度相近的支座.

关键词:隔震;橡胶支座;压缩刚度;剪切刚度;力学性能

中图分类号:TU352.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2023)02-0041-07

On Correlation of Mechanical Properties of Small Laminated Rubber Bearings

LUO Chuxiong

(China Aviation Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Beijing 100032, China)

Abstract: Due to the non-proportional scaling of the dimensions of the small rubber bearings used in the vibration table, which differs significantly from the specifications in GB/T 20688.3—2006. It is necessary to investigate their mechanical properties through experiments. In this paper, the compression and shear properties of six small laminated rubber bearings are studied by experiments. The results show that the calculation method of vertical compression stiffness provided by GB/T 20688.3—2006 is not suitable for small scaled rubber bearings, while the calculation method of shear stiffness has some reference value. Therefore, before the isolation experiment on the vibration table, the stiffness of the bearings should be measured, and bearings with closer stiffness values should be selected for subsequent experiments. The differential settlement caused by the dispersion of compression stiffness is minimal, so priority should be given to supports with similar horizontal shear stiffness.

Keywords: isolation; rubber bearing; compression stiffness; shear stiffness; mechanical properties

地震是世界上破坏力最大的自然灾害之一,会造成巨大的人员伤亡和经济损失^[1].地震发生时,建筑物产生受迫震动,其构件受惯性作用发生位移和变形,导致建筑物出现局部损伤甚至整体坍塌^[2-4].我国多省市位于地震高发带,灾害频发,因建筑物倒塌造成的人员伤亡和经济损失触目惊心,因此,建筑物抗震

收稿日期:2021-09-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378047)

*通信作者,E-mail:Kuyson@163.com

设防的研究受到越来越多的重视^[5]。

在传统的建筑物抗震设防理念中,人们普遍采用增大材料强度和用量等“硬碰硬”的方式抵御震害.随着对震害的深入了解,研究者发现传统的抗震设防理念存在诸多弊端:首先,提高材料强度和用量,如增加水泥用量,加大标号,增加梁、板、柱截面,加大钢筋用量等,都会提高工程造价,增加成本;其次,建筑物较为笨重,内部空间被压缩,有效空间减少,单位材料的使用效率低;最后,由于较大的刚度,“硬派”结构体系不仅无法释放地震产生的巨大能量,反而由于太“硬”而加速能量传递,加剧建筑物的损坏与倒塌.此外,刚度大的建筑物因较快的震动频率会导致舒适度的下降^[6]。

区别于传统的抗震设计理念,隔震理念通过设置柔性隔震层来减小地震动在结构中的传递,以达到减小建筑物损坏的目的,是一种“以柔克刚”的理念^[6-7].在目前的建筑工程中,将橡胶支座应用于隔震技术的方法较为普遍,也较为成熟^[8-10].早在20世纪中叶,机械工程和建筑工程就开始广泛使用阻尼和造价具有极大优势的橡胶作为减震耗能的材料.叠层橡胶支座是由橡胶材料和钢板叠合压制而成,在进行振动台试验时,上部结构需要根据振动台的尺寸按一定比例缩小,而由于叠层橡胶支座的加工工艺对橡胶层厚度、钢板厚度和叠合层数的限制,支座无法同比例缩小,导致其力学性能也无法依照原计算公式计算.因此,研究缩尺小型叠层橡胶支座的力学性能有一定的实际意义。

1 试验准备

1.1 试验支座规格及理论力学性能

试验选取6个规格相同的普通叠层天然橡胶支座,生产厂家均为河北震安减隔震技术有限公司.支座规格参数见图1,为使支座的力学性能相近,选取的支座均为同批次生产,钢板均采用Q235,叠层橡胶均采用天然橡胶,剪切模量为0.4 MPa.试验为白天进行,环境平均温度为10~23℃,支座编号为1~6.

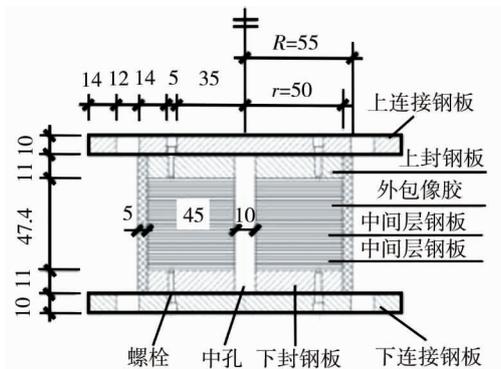


图1 橡胶支座剖面图(单位:mm)

根据GB/T 20688.3—2006可得:本次试验支座的第1形状系数 $S_1=15$,第2形状系数 $S_2\approx 3.7$,竖向压缩刚度计算值 $K_{V1}\approx 97$ kN/mm,剪切刚度计算值 $K_S\approx 115$ kN/mm.通过与本次试验所采用的橡胶支座的生产厂家进行沟通可知,由于加工工艺无法满足支座等比例缩尺,现存规范不完全适用其力学性能理论的计算^[1].厂家推荐本批支座的估计压缩刚度 $K_{V2}\approx 42$ kN/mm.

1.2 试验装置及工况

1.2.1 压缩性能的压应力试验

采用YAW-3000微机控制电液伺服压力试验机进行试验,最大竖向压力100 kN(精度1%),可控位移精度0.01 mm/s,加载精度20 N/s,全自动往复加载,可满足橡胶支座压缩试验的精度要求。

由于支座进行试验后将用于振动台试验,所以支座的竖向压力设计值为振动台试验模型的总重量,为52 kN,共4个橡胶支座,压力标准值 $P_d=13$ kN.

为研究支座在不同竖向压力下压缩刚度的变化,试验分别测试标准压力值 P_0 在100% P_d (13 kN)、150% P_d (19.5 kN)和200% P_d (26 kN)的竖向荷载下橡胶支座的竖向刚度.根据GB/T 20688.1—2007,令 $P_1=0.7P_0$, $P_2=1.3P_0$,首先一次性加载到 P_1 ,然后按 P_1 - P_2 - P_1 循环加载3次后卸载^[11]。

实测的竖向压缩刚度 K_V 按式(1)计算:

$$K_V = \frac{P_b - P_a}{Y_b - Y_a} \quad (1)$$

式中: P_a , P_b 为第3次循环加载中的最小压力值和最大压力值; Y_a , Y_b 为第3次循环加载中的最小竖向位移和最大竖向位移。

1.2.2 剪切性能的剪切位移相关性试验

剪切性能及其相关性试验需要对橡胶支座施加水平剪切位移^[11], 由于实际情况中支座承受的竖向压力可能对实测剪切刚度产生影响, 所以需要同时对橡胶支座施加竖向荷载^[12-15]. 所采用的试验装置如图2所示, 竖向加载采用高压电动油泵千斤顶(500 kN, 精度0.01 kN), 横向加载采用 MTS 液压作动器(2 000 kN, 精度0.01 kN), 位移最大限值为±125 mm, 加载速度实测最高约为70 mm/s(精度0.1 mm). 施加水平位移时, 在下加载板与垫板之间放置光滑滚轴. 左支架开竖直方向长孔, 上加载板上焊接两根丝杆穿过左边长孔, 以便竖向加载时能活动^[2].

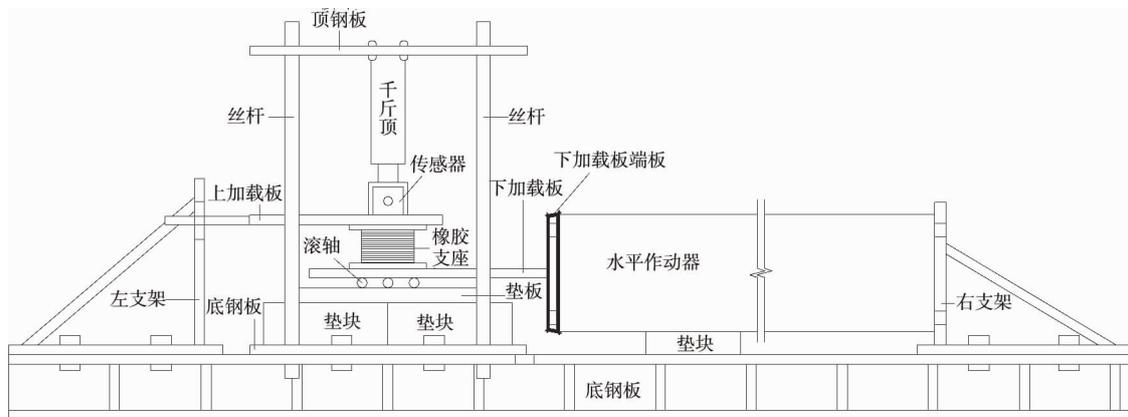


图2 试验装置立面图

为方便对比, 将橡胶支座的内部橡胶层的总厚度设为本次试验的剪切位移, 即 $\gamma_0 = 27.0$ mm. 为测定支座在不同剪切位移下的剪切刚度变化, 在 $100\%P_d$ (13 kN) 的恒定压力下采用单剪试验方法, 对支座施加剪切位移为 $10\%\gamma_0$ (2.7 mm), $20\%\gamma_0$ (5.4 mm), $50\%\gamma_0$ (13.5 mm), $100\%\gamma_0$ (27.0 mm), $150\%\gamma_0$ (40.5 mm) 和 $200\%\gamma_0$ (54.0 mm) 的循环加载3次, 加载速度为1 mm/s.

实测剪切刚度 K_s 按式(2)计算:

$$K_s = \frac{Q_b - Q_a}{\gamma_b - \gamma_a} \quad (2)$$

式中: Q_a , Q_b 为第3次循环加载中的最小剪力值和最大剪力值; γ_a , γ_b 为第3次循环加载中的最小水平位移和最大水平位移。

2 试验结果及分析

2.1 压缩性能的压应力相关性试验结果及分析

由于篇幅限制, 仅列出1号支座在不同工况下的压力-位移曲线如图3所示. 由图3可知: 初始加载阶段有一段虚位移, 是支座顶部钢板与竖向千斤顶的接触面不平行所导致, 不影响试验结果, 除第1次加载外, 曲线的重合度较高, 说明在第1次加载时材料空隙已得到较为充分地挤压, 支座进入近完全弹性状态.

按式(1)计算6个支座在不同竖向压力下的压缩刚度, 结果见表1和图4. 不同支座的压缩刚度的变化见图5. 将全部工况与 $100\%P_d$ 的竖向压缩刚度进行对比, 结果见表2. 理论刚度与 $100\%P_d$ 的竖向压缩刚度对比结果见表3.

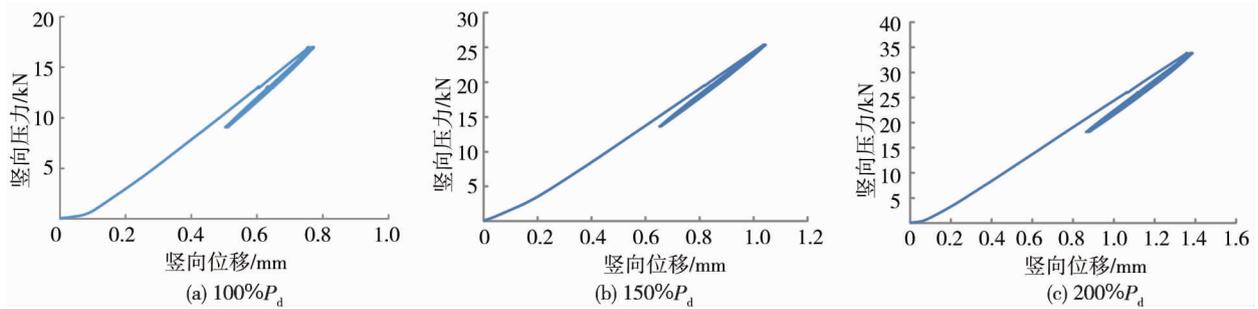


图3 不同工况下压力-位移曲线

表1 不同竖向压力下的压缩刚度

压力	支座1	支座2	支座3	支座4	支座5	支座6
100% P_d	30.1	29.0	30.2	26.5	26.9	28.6
150% P_d	31.2	31.8	33.0	28.0	28.6	30.4
200% P_d	30.8	29.7	31.2	27.5	27.7	29.8

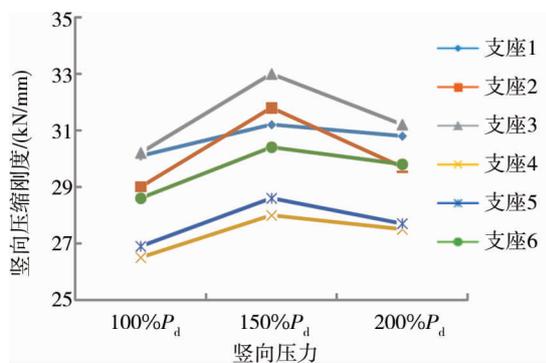


图4 竖向压缩刚度随压力的变化趋势

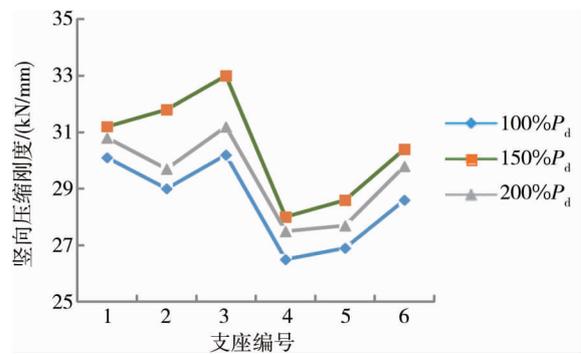


图5 不同支座的压缩刚度对比

表2 其他工况与100% P_d 的竖向压缩刚度对比

压力	支座1	支座2	支座3	支座4	支座5	支座6	平均值
100% P_d	0	0	0	0	0	0	0
150% P_d	3.7	9.7	9.3	5.7	6.3	6.3	6.8
200% P_d	2.3	2.4	3.3	3.8	3.0	4.2	3.2

由表2和图4可知:竖向压力与支座的压缩刚度相关,支座压缩刚度随着压力的增加呈先增大后减小的趋势,竖向压力150% P_d 相比100% P_d 时的压缩刚度平均增加6.8%,竖向压力达到200% P_d 时,对比150% P_d 时的压缩刚度均略有下降,但依旧比100% P_d 增加3.2%。

由图5可知:支座的实测刚度具有一定的离散性,可能是加工工艺的限制以及材料间的缝隙不均匀等因素所导致.100% P_d 工况下,竖向压缩刚度的最大差值为3.7 kN/mm(支座3为30.2 kN/mm,支座4为26.5 kN/mm),由于竖向压缩刚度不同产生的高度差仅为0.06 mm,对后续振动台试验的影响极小,可以忽略不计。

表3 理论刚度与100% P_d 实际刚度对比

支座	支座1	支座2	支座3	支座4	支座5	支座6
计算刚度 K_{V1} /(kN/mm)	97	97	97	97	97	97
估计刚度 K_{V2} /(kN/mm)	42	42	42	42	42	42
100% P_d 实际刚度/(kN/mm)	30.1	29.0	30.2	26.5	26.9	28.6
与 K_{V1} 的差值比/%	69.0	70.1	68.9	72.7	72.3	70.5
与 K_{V2} 的差值比/%	28.3	31.0	28.1	36.9	36.0	31.9

由表3可知:竖向压缩刚度的理论值和厂家推荐的估计值较试验实测值均偏大.其中,实测刚度与计

算刚度 K_{V1} 有较大差异,可达 70%左右,说明小型缩尺橡胶支座的竖向刚度无法采用 GB/T 20688.3—2006 中的公式进行计算.实测刚度与厂家推荐的估计刚度 K_{V2} 也有 30%左右的差异,可以看出,非同比例缩尺小型橡胶支座有必要通过试验测算其压缩刚度.

2.2 剪切性能的剪切位移相关性试验结果及分析

由于本文篇幅限制,仅列出支座 1 在不同工况下的剪力-位移曲线如图 6 所示.

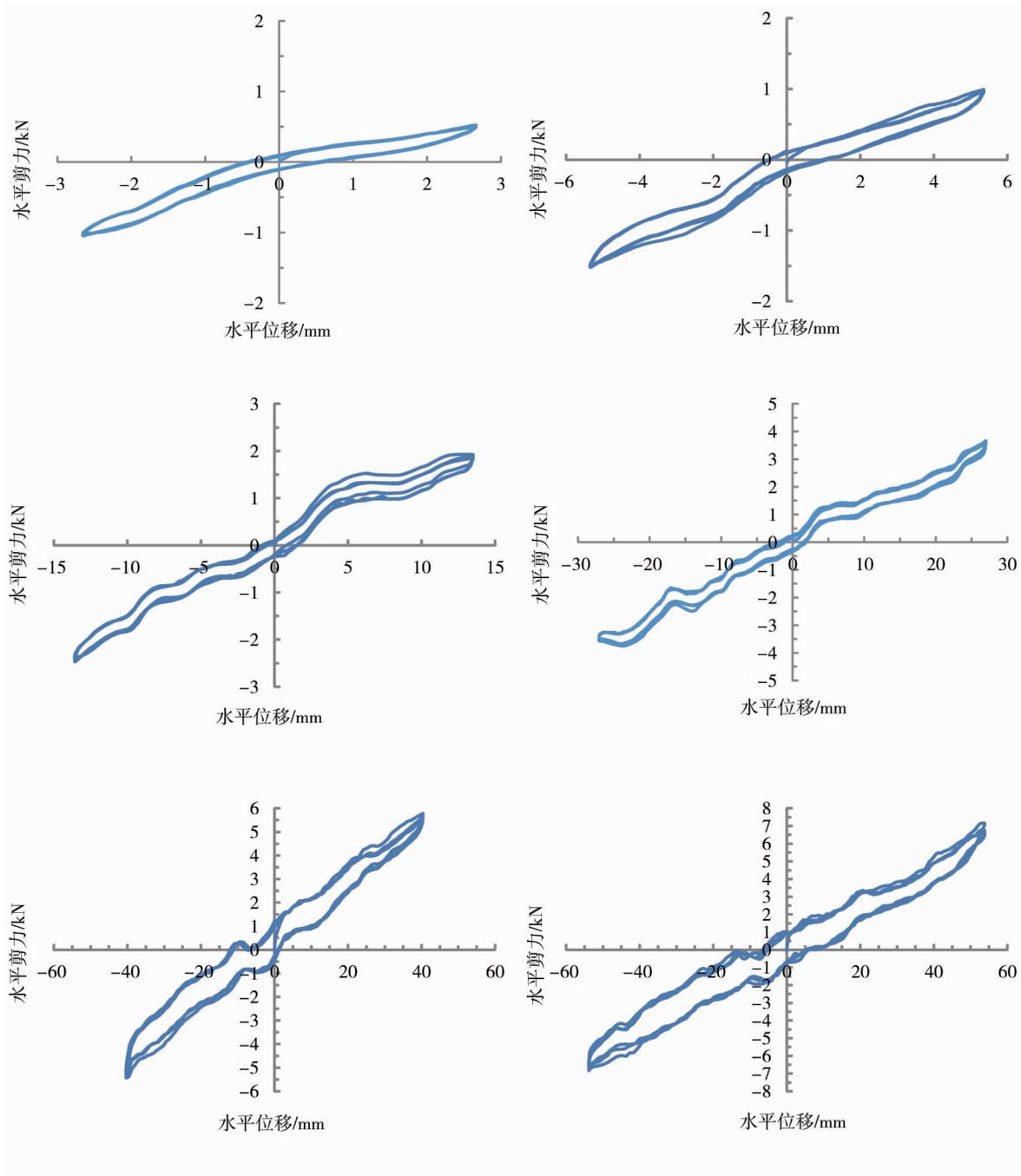


图6 不同工况下的剪力-位移曲线

按式(2)计算所有工况下的剪切刚度,结果见表4.支座在 $100\% \gamma_0$ 的剪切刚度与理论剪切刚度的对比结果见表5.将所有工况下的剪切刚度与 $100\% \gamma_0$ 剪切位移下的刚度进行对比,结果见表6.不同剪切位移下刚度的变化趋势如图7所示.

由表5可知:剪切刚度实测值比理论值高出 7.8%~26.1%,有较为明显的差异且离散性较大.在 GB/T 20688.1—2007和 GB/T 20688.3—2006 中,常用的典型橡胶支座的最小钢板厚度及叠层橡胶厚度为

2 mm, 支座直径为 400 mm, 尺寸远超本次试验的支座规格, 但从试验数据观察可知, 规范中的计算方法仍适用于本次试验支座.

表 4 支座在不同工况下的实测剪切刚度

N/mm

支座	10% γ_0 (2.7 mm)	20% γ_0 (5.4 mm)	50% γ_0 (13.5 mm)	100% γ_0 (27.0 mm)	150% γ_0 (40.5 mm)	200% γ_0 (54.0 mm)
支座 1	294	232	162	135	134	122
支座 2	209	187	174	137	121	116
支座 3	251	181	139	125	120	114
支座 4	241	195	153	124	118	109
支座 5	358	227	171	145	112	123
支座 6	199	178	130	139	114	112

表 5 支座在 100% γ_0 工况与理论剪切刚度对比

支座	支座 1	支座 2	支座 3	支座 4	支座 5	支座 6
理论剪切刚度/(N/mm)	115	115	115	115	115	115
实测刚度/(N/mm)	135	137	125	124	145	139
差值比/%	17.4	19.1	8.7	7.8	26.1	20.9

表 6 其他工况剪切刚度与 100% γ_0 相比较

%

剪切位移	支座 1	支座 2	支座 3	支座 4	支座 5	支座 6
10% γ_0 (2.7 mm)	217.8	152.6	200.8	194.4	246.9	143.2
20% γ_0 (5.4 mm)	171.9	136.5	144.8	157.3	156.6	128.1
50% γ_0 (13.5 mm)	120.0	127.0	111.2	123.4	117.9	93.5
100% γ_0 (27.0 mm)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
150% γ_0 (40.5 mm)	99.3	88.3	96.0	95.2	77.2	82.0
200% γ_0 (54.0 mm)	90.4	84.7	91.2	87.9	84.8	80.6

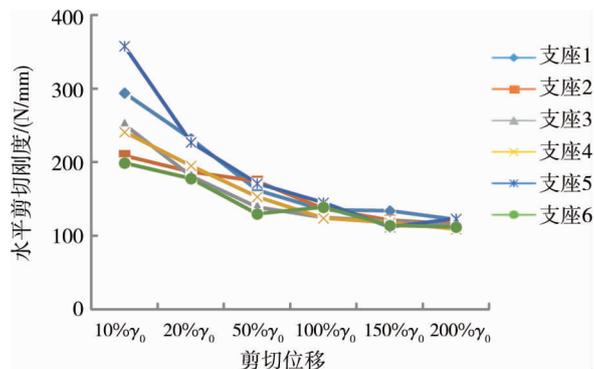


图 7 支座在不同剪切位移下的水平剪切刚度变化趋势

由表 6 和图 7 可知:随着剪切位移的增加,支座在不同剪切位移下的刚度整体上呈凹形下降趋势,并逐渐趋于平缓;另外,支座的初始剪切刚度表现出一定的离散性,但随着剪切位移的不断增加,离散性不断减小,在 200% γ_0 (54.0 mm) 工况时,所有支座的剪切刚度较为相近.初始剪切刚度的离散性可能是加工工艺或试验设备受限所导致.

3 结论

1) 由于橡胶的作用,支座均有较强的竖向压缩弹性,支座压缩刚度随着压力的增加呈先增大后减小的趋势.试验发现小型缩尺橡胶支座的竖向刚度无法采用 GB/T 20688.3—2006 中的公式进行计算,非同比例缩尺小型橡胶支座有必要通过试验测算其压缩刚度.

2) 由于橡胶和叠层钢板的协同作用,支座均有较强的剪切弹性.实测剪切刚度稍大于理论计算刚度,

可知支座的剪切刚度在设计阶段也可使用 GB/T 20688.3—2006 中的计算公式进行估算. 支座发生剪切位移时, 初始刚度较大, 且不同支座之间的初始刚度差异较大. 随着剪切位移的不断增加, 剪切刚度整体呈凹形下降趋势, 并逐渐趋于平缓. 剪切位移越大, 不同支座剪切刚度的差异越小.

3) 由于加工工艺的限制以及材料间的缝隙不均匀等因素的影响, 支座刚度表现出一定的离散性, 后续用于振动台试验的小型缩尺橡胶支座应提前检测其力学性能, 筛选出刚度差异较小的支座. 支座之间压缩刚度的差异较小, 造成的不均匀沉降最大仅为 0.06 mm, 相比后续振动台试验的上部结构尺寸和重量可忽略不计, 应选择实测剪切刚度相近的支座进行试验.

参考文献:

- [1] CHOPRA A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering[M]. 4th ed. Englewood: Prentice Hall, 2012.
- [2] 孙欢. 近断层地震作用隔震层限位振动台实验研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.
- [3] 段燕玲. 隔震结构近断层地震响应振动台实验研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2013.
- [4] 苏健. 叠层橡胶支座力学性能和高架桥及高层隔震结构地震响应研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2012.
- [5] 尹锦明, 田涛, 王永. 强震后铅芯橡胶支座在简支梁桥恢复重建中的应用[J]. 中外公路, 2016, 36(1): 140-143.
- [6] 苏经宇, 曾德民, 田杰. 隔震建筑概论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [7] 刘文光. 橡胶隔震支座力学性能及隔震结构地震反应分析研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.
- [8] 丁攀攀. 国内建筑隔震橡胶支座的研究现状与进展[J]. 橡胶工业, 2009, 56(8): 506-511.
- [9] 全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会橡胶杂品分技术委员会, 广州大学工程抗震研究中心. 橡胶支座国家标准理解与实施[M]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [10] 刘兴衡, 张志强, 韩绪年. 建筑隔震橡胶支座的种类及应用(一)[J]. 橡胶科技市场, 2008(2): 15-18.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 橡胶支座 第1部分: 隔震橡胶支座实验方法: GB/T 20688.1—2007[S]. 2007.
- [12] TAKAOKA E. Nonlinear mechanical model for laminated rubber bearings subjected to monotonic loading based on Haringx's theory[J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 2014, 79(701): 913-921.
- [13] PROVIDAKIS C P. Effect of LRB isolators and supplement viscous dampers on seismic isolated buildings under near-fault excitations[J]. Engineering Structures, 2008, 30(5): 1187-1198.
- [14] DING L, ZHU H P, WU L. Analysis of mechanical properties of laminated rubber bearings base on transfer matrix method[J]. Composite Structures, 2017, 159: 390-396.
- [15] VENKITTARAMAN A, BANERJEE S. Enhancing resilience of highway bridges through seismic retrofit[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(8): 1173-1191.