

产品·设计

隔震橡胶支座拉伸性能研究

李诗瑶, 陆浩, 赵庆兵, 赵晨旭, 周家孝, 吴建伟, 王贤彬, 朱恩来

(震安科技股份有限公司, 云南 昆明 650041)

摘要: 基于隔震橡胶支座竖向抗拉能力不足的缺点, 对隔震橡胶支座拉伸性能及拉伸后力学性能进行试验研究。结果表明: 支座屈服拉应力根据橡胶剪切模量不同可达2.0~2.7 MPa, 极限拉应力约为5 MPa, 极限拉应变在350%左右; 支座经单轴拉伸后, 常规力学性能变化不大, 且支座竖向压缩极限性能和水平剪切极限性能也能够较好地保持, 体现出较好的功能性和安全性。

关键词: 隔震橡胶支座; 拉伸性能; 屈服拉应力; 极限拉应力

中图分类号: TQ336.4⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2022)05-0357-07

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2022.05.0357



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

隔震技术自问世以来, 被广泛推广和应用于低层建筑, 经过地震检验证明其隔震效果良好^[1-5]。随着社会的发展及城市化进程的推进, 目前在城市建设中, 高层建筑占比越来越大^[6], 国家标准^[7]明确规定, 隔震橡胶支座在罕遇地震下, 竖向拉应力不能大于1 MPa, 而高层建筑由于地震产生的倾覆力矩远远超过限制, 这很大程度上限制了隔震技术在高层建筑上的应用。为此, 国内外大量的研究人员通过试验对隔震橡胶支座的拉伸性能进行了研究。

T. MANO等^[8]对直径450 mm的模型隔震橡胶支座进行了拉伸试验, 结果表明, 支座拉伸后力学性能变化不超过10%, 且支座第二形状因数(S_2)相同时, 单层橡胶越薄, 支座屈服拉应力越大。刘文光^[9]对LNR300隔震橡胶支座进行了试验研究, 结果表明, 支座单轴拉伸屈服拉应力为1.6 MPa左右, 在拉剪工况下, 随着剪应变的增大, 橡胶发生硬化, 支座拉伸刚度先减小后增大, 在剪应变100%时达到最小。刘亚东等^[10]对LNR300隔震橡胶支座进行了拉伸试验, 研究表明, 随着剪应变的增大, 支座屈服拉应力逐渐减小。许强^[11]也采用

LNR300隔震橡胶支座进行了试验, 结果表明, 拉剪对支座常规力学性能影响不大, 剪应变增大后, 支座拉伸刚度减小。金建敏等^[12]对D600-G4橡胶支座进行了拉伸性能试验, 剪应变为零时, 支座屈服拉伸强度达1.2 MPa, 剪应变为100%时, 支座屈服拉伸强度减小至1.04 MPa, 支座屈服拉伸强度随剪应变的增大而减小。韩强等^[13]对设计剪切模量为0.4 MPa的D300橡胶隔震支座进行了拉伸性能试验, 在剪应变为零时, 支座屈服拉伸强度达1.6 MPa左右, 随着剪应变增大到100%和250%, 由于橡胶硬化, 支座拉伸刚度略有增大。陈鹏等^[14]采用D600普通隔震橡胶支座和带有抗拉装置的隔震橡胶支座进行了拉伸试验以及拉剪、纯剪、压剪工况下的滞回曲线对比, 结果表明, 普通支座在拉应力为0.5 MPa时即进入屈服状态, 带抗拉装置的支座拉应力随拉应变的增大呈线性增长, 在纯剪和压剪状态下, 支座一次循环的滞回面积相差不大, 但在拉剪状态下, 滞回环向内收缩, 耗能水平下降, 而带有抗拉装置的支座未表现出滞回环内缩现象。

从目前所知的研究结果来看, 隔震橡胶支座

作者简介: 李诗瑶(1992—), 男, 云南昆明人, 震安科技股份有限公司工程师, 学士, 主要从事隔震支座产品生产及研究。

E-mail: 1012497416@qq.com

引用本文: 李诗瑶, 陆浩, 赵庆兵, 等. 隔震橡胶支座拉伸性能研究[J]. 橡胶工业, 2022, 69(5): 357-363.

Citation: LI Shiyao, LU Hao, ZHAO Qingbing, et al. Study on tensile properties of isolation rubber bearing[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(5): 357-363.

的屈服拉伸强度普遍在1~2 MPa之间,相较于规范要求其安全因数较小,无法运用于高宽比大的建筑。本工作基于目前研究现状,考虑到隔震橡胶支座生产工艺和质量的提升,对公司现有产品的拉伸性能进行试验研究,以期为后续研究提供依据。

1 试验设备及试件

1.1 试验设备

伺服压剪试验机(见图1),济南三越测试仪器有限公司产品,最大竖向压缩荷载 35 000 kN,最大拉伸载荷 3 500 kN,最大水平荷载 8 000 kN,最大竖向行程 1 200 mm,最大水平行程 ±1 000 mm。



图1 伺服压剪试验机

Fig.1 Servo compression shear testing machine

1.2 试件

隔震橡胶支座(以下简称支座)试件参数如表1所示。

表1 试件基本参数

Tab.1 Basic parameters of test pieces

项 目	支座编号			
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
规格	LNR600	LNR600	LRB600	LNR600
剪切模量/MPa	0.392	0.500	0.500	0.392
橡胶层总厚度/mm	112	112	112	112
$S_1^{(1)}$	19.0	19.0	22.8	19.0
S_2	5.4	5.4	5.4	5.4
支座总高度/mm	222.5	222.5	222.5	222.5

注:1)第一形状因数。

2 试验内容及加载方法

2.1 试验内容

试验一:选用1[#],2[#],3[#]支座进行拉伸性能及拉

伸后常规力学性能研究。

试验二:选用4[#]支座进行拉伸后的极限性能研究。

2.2 加载方法

试验一:支座在压应力12 MPa、频率0.03 Hz下进行竖向压缩和水平剪切,剪应变为100%,之后对支座进行单轴拉伸,拉伸速度为1 mm·s⁻¹,每次单轴拉伸后进行竖向压缩和水平剪切,再进行单轴拉伸。1[#]支座拉应变为0%,10%,15%,破坏;2[#]支座拉应变为0%,5%,10%,15%,30%,60%,100%,150%,200%,250%,300%,350%,破坏;3[#]支座拉应变为0%,5%,10%,50%,100%,200%,250%,300%,破坏。

试验二:支座在压应力12 MPa、频率0.03 Hz以及剪应变0%,50%,100%,200%,300%下依次进行水平力学性能检测,每次剪切前后测试支座竖向压缩刚度,然后分别将支座进行拉应变为15%,100%,250%的单轴拉伸试验,每次拉伸后进行水平及竖向力学性能检测,对比力学性能变化情况,试验结束后进行竖向极限压缩和0.55D(支座直径的0.55)剪应变下的极限压应力试验,然后对支座进行水平极限剪切试验,试验工况如表2所示。

表2 试验二试验工况

Tab.2 Test conditions of test II

序号	试验内容	加载工况
1	拉伸前力学性能测试	剪应变0%,50%,100%,200%,300% 下各3次滞回,每次剪切前后测试竖向压缩刚度
2	拉应变15%后力学性能测试	剪应变0%,50%,100%,200%,300% 下各3次滞回,每次剪切前后测试竖向压缩刚度
3	拉应变100%后力学性能测试	剪应变0%,50%,100%,200%,300% 下各3次滞回,每次剪切前后测试竖向压缩刚度
4	拉应变250%后力学性能测试	剪应变0%,50%,100%,200%,300% 下各3次滞回,每次剪切前后测试竖向压缩刚度
5	竖向极限压应力	零剪应变下竖向加载至90 MPa
6	0.55D剪应变下的极限压应力	0.55D剪应变下竖向加载至30 MPa
7	水平极限剪切	竖向压力12 MPa,剪应变400%下3次滞回

3 结果与讨论

3.1 试验一

根据试验工况,得到的1[#],2[#]和3[#]支座的拉力-拉伸位移曲线如图2—4所示,拉伸性能如表3所示。

从图2—4和表3可以看出,支座的屈服拉应力和拉伸刚度随橡胶剪切模量的增大而增大,相同橡胶剪切模量的铅芯支座(3[#]支座)与天然橡胶支座(2[#]支座)屈服拉应力没有明显的差别,支座极限拉应力约为屈服拉应力(第1次拉伸)的2倍左右,极限拉应变在350%左右。支座经过反复拉伸,特别是拉伸屈服后,屈服拉应力和拉伸刚度明显减

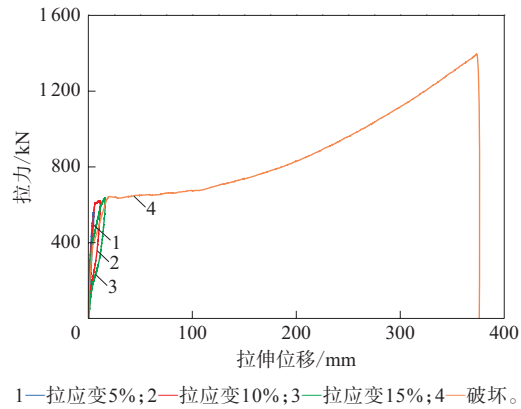


图2 1[#]支座拉力-拉伸位移曲线
Fig. 2 Tension-tensile displacement curves of 1[#] bearing

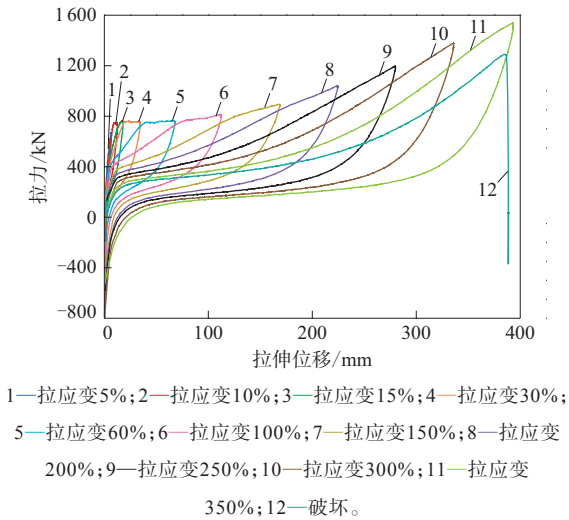


图3 2[#]支座拉力-拉伸位移曲线
Fig. 3 Tension-tensile displacement curves of 2[#] bearing

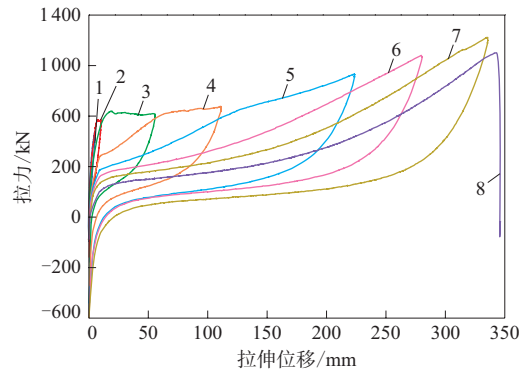


图4 3[#]支座拉力-拉伸位移曲线
Fig. 4 Tension-tensile displacement curves of 3[#] bearing

项 目	支座编号		
	1 [#]	2 [#]	3 [#]
橡胶剪切模量/MPa	0.392	0.500	0.500
屈服拉应变/%	6.30	8.10	7.30
屈服拉应力/MPa	2.23	2.72	2.58
极限拉应变/%	334.60	350.00	309.40
极限拉应力/MPa	5.09	5.61	4.58
拉伸刚度/(kN·mm ⁻¹)	55.15	66.35	65.62

小,这是因为支座拉伸屈服后橡胶内部出现了损伤,产生了孔洞^[15]。

对2[#]和3[#]支座屈服拉应力和拉伸刚度随拉应变的变化情况进行分析,结果如图5和6所示(为了更直观地看到变化情况,对试验数据进行了归一化处理,下同)。

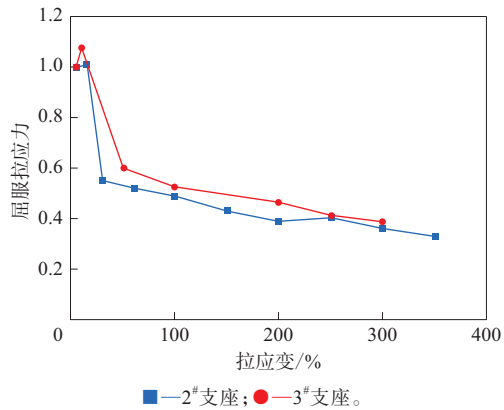
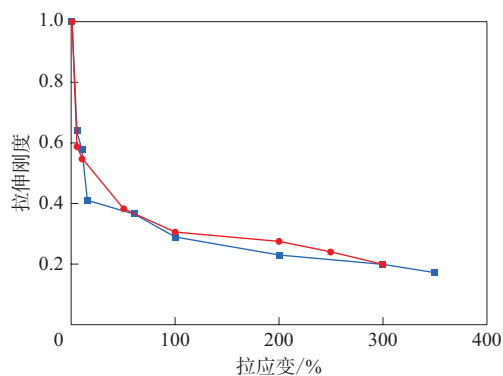


图5 2[#]和3[#]支座屈服拉应力-拉应变曲线
Fig. 5 Yield tensile stress-tensile strain curves of 2[#] and 3[#] bearings



注同图5。

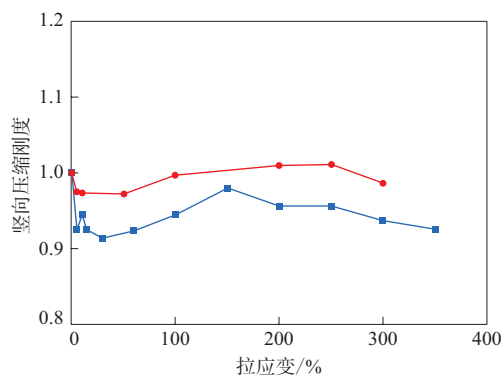
图6 2#和3#支座拉伸刚度-拉应变曲线

Fig. 6 Tensile stiffness-tensile strain curves of 2# and 3# bearings

从图5和6可以看出, 支座屈服拉应力和拉伸刚度随拉应变和拉伸次数的增大逐渐减小, 在拉应变50%前减小较快, 之后减幅趋于稳定。在拉应变300%时, 支座屈服拉应力下降60%左右, 拉伸刚度减小80%左右, 这是因为橡胶在拉伸过程中内部出现孔洞, 橡胶本体发生了一定程度的破坏, 导致拉伸性能衰减。

2#和3#支座竖向压缩刚度和等效水平刚度随拉应变的变化情况分别如图7和8所示, 3#支座其余常规力学性能随拉应变的变化情况如图9所示。

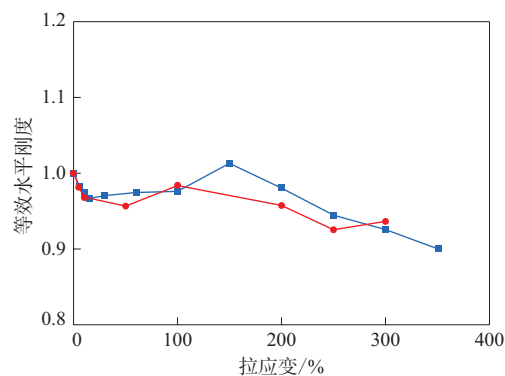
从图7—9可以看出, 支座在经历较大的拉伸变形后, 力学性能变化不大, 竖向压缩刚度、等效水平刚度和屈服后刚度整体随拉应变的增大而减小, 变化率基本在10%以内, 3#支座(铅芯支座)屈



注同图5。

图7 2#和3#支座竖向压缩刚度-拉应变曲线

Fig. 7 Vertical compression stiffness-tensile strain curves of 2# and 3# bearings



注同图5。

图8 2#和3#支座等效水平刚度-拉应变曲线

Fig. 8 Equivalent horizontal stiffness-tensile strain curves of 2# and 3# bearings

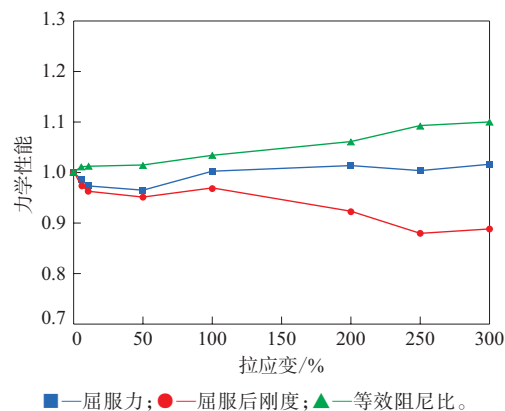


图9 3#支座3项力学性能-拉应变曲线

Fig. 9 Three mechanical property-tensile strain curves of 3# bearing

服力和等效阻尼比随拉应变的增大而增大, 变化率也在10%以内, 说明拉伸过程中橡胶的损坏对支座常规力学性能的影响不大, 支座隔震效果保持完好。

3.2 试验二

根据试验工况, 得到4#支座拉伸前后力学性能变化情况如表4、图10和11所示。

从图10和11可以看出, 随着剪应变的增大, 拉伸前支座竖向压缩刚度明显减小, 在剪应变为300%时, 下降幅度达到22%, 在经历了拉伸后, 支座竖向压缩刚度随剪应变的增大仅小幅减小, 减幅约5%。

支座等效水平刚度随着剪应变的增大呈先减小后增大的趋势, 在剪应变为200%时达到最小, 后由于橡胶硬化, 等效水平刚度增大, 在经历了300%

水平剪切和拉伸后, 支座等效水平刚度整体减小 10%~25%。之前的试验证明, 相同剪应变下, 拉应变从 15% 增大至 250%, 支座等效水平刚度基本无差异, 即拉伸对支座等效水平刚度的影响较小, 因此, 支座等效水平刚度减小主要是受较大的剪

表 4 4 [#] 支座拉伸前后力学性能				
Tab. 4 Mechanical properties before and after tension of 4 [#] bearing				
剪应变	竖向压缩刚度/ (kN·mm ⁻¹)	等效水平刚度/ (kN·mm ⁻¹)	竖向压缩刚度归一化	等效水平刚度归一化
拉应变 0%				
0	1 960.95		1.00	
50%	1 827.43	1.275	0.93	1.00
100%	1 734.45	1.025	0.88	0.80
200%	1 611.72	0.923	0.82	0.72
300%	1 528.89	0.980	0.78	0.77
拉应变 15%				
0	1 593.02		0.81	
50%	1 584.62	0.915	0.81	0.72
100%	1 548.87	0.750	0.79	0.59
200%	1 536.57	0.715	0.78	0.56
300%	1 501.46	0.887	0.77	0.70
拉应变 100%				
0	1 581.54		0.81	
50%	1 535.07	0.905	0.78	0.71
100%	1 558.33	0.736	0.79	0.58
200%	1 513.24	0.679	0.77	0.53
300%	1 501.46	0.859	0.77	0.67
拉应变 250%				
0	1 631.75		0.83	
50%	1 596.12	0.904	0.81	0.71
100%	1 559.09	0.758	0.80	0.59
200%	1 548.12	0.702	0.79	0.55
300%	1 523.70	0.868	0.78	0.68

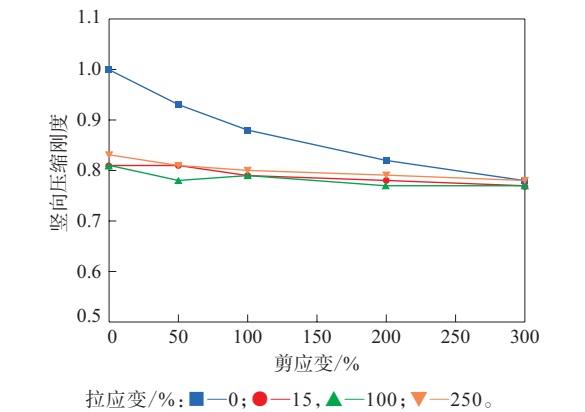


图 10 4[#]支座拉伸后竖向压缩刚度-剪应变曲线
Fig. 10 Vertical compression stiffness-shear strain curves of 4[#] bearing after tension

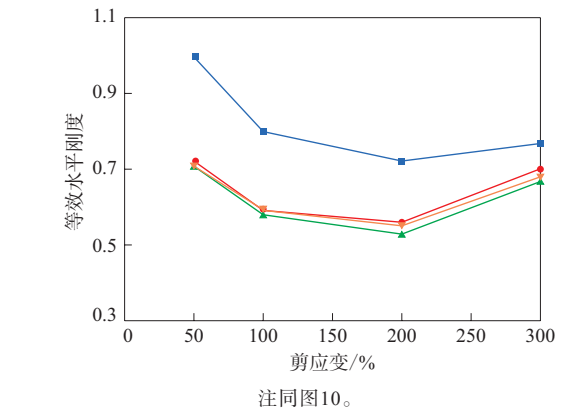


图 11 4[#]支座拉伸后等效水平刚度-剪应变曲线
Fig. 11 Equivalent horizontal stiffness-shear strain curves of 4[#] bearing after tension

切变形影响(导致了橡胶的损伤)。
支座在经历了 50%~300% 剪应变, 15%, 100%, 250% 拉应变等一系列试验后, 进行了竖向极限压应力和 0.55D 剪应变时的极限压应力试验, 结果如图 12 和 13 所示。

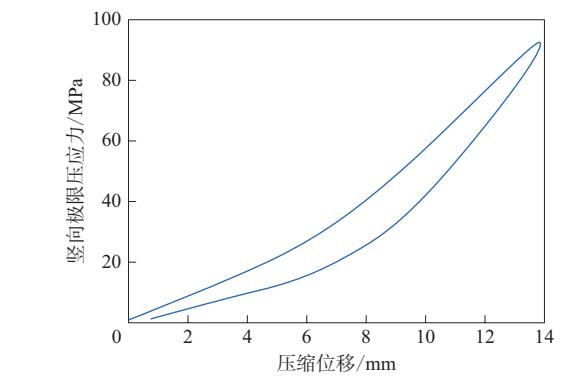


图 12 4[#]支座竖向极限压应力-压缩位移曲线
Fig. 12 Vertical ultimate compressive stress-compression displacement curve of 4[#] bearing

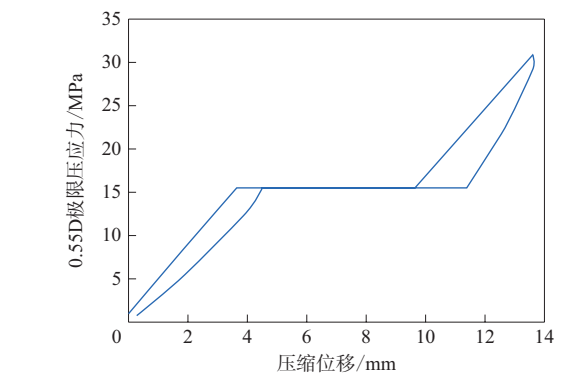


图 13 4[#]支座 0.55D 极限压应力-压缩位移曲线
Fig. 13 0.55D ultimate compressive stress-compression displacement curve of 4[#] bearing

从图12和13可以看出,支座竖向极限压应力达到92 MPa,0.55D极限压应力达到30.9 MPa,满足行业标准要求,且试验过程中,仅竖向压应力作用下支座出现了较大的侧向不均匀变形,试验完成后支座完好无损,试验曲线光滑无异常。

上述试验完成后,对支座进行400%水平剪应变下3圈循环试验,结果如图14所示。

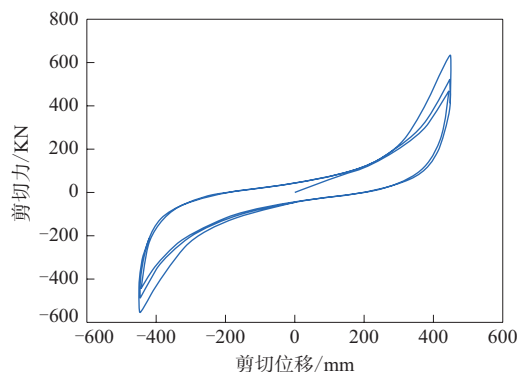


图14 4#支座400%剪应变下3圈循环试验曲线

Fig. 14 3-cycle test curve of 4# bearing at 400% shear strain

从图14可以看出,支座在经历拉伸、水平剪切、极限受压等一系列试验后,水平剪切变形依旧达到400%,且试验后支座外观无异常,试验曲线光滑无异常。

4 结论

(1) 支座屈服拉应变在8%左右,屈服拉应力和拉伸刚度随着橡胶剪切模量的增大而增大,屈服拉应力普遍在2.2~2.7 MPa之间。

(2) 支座极限拉应变在350%左右,受支座内部橡胶物理性能、硫化情况、粘接情况以及环境温度等因素综合影响,支座屈服拉应力(第1次拉伸)与极限拉应力之比约为1:2。

(3) 支座拉伸后,竖向压缩刚度和等效水平刚度稍有减小,但变化不大,铅芯支座屈服力和等效阻尼比略微增大,变化率均在10%以内。

(4) 支座拉伸后,水平及竖向力学性能变化不大,导致支座力学性能明显下降的因素是大变形剪切,且支座拉伸后,力学性能变化趋势与拉伸前基本一致。

(5) 支座拉伸后,竖向极限承载能力和水平极限变形能力保持完好,即支座经拉伸后仍具有较

好的功能性和安全性。

参考文献:

- [1] 李雅静,王昊,王振源,等. 村镇建筑基础隔震技术研究综述[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(2): 88-95, 136.
LI Y J, WANG H, WANG Z Y, et al. A review of research on base isolation technology in rural buildings[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2021, 43(2): 88-95, 136.
- [2] 段亚飞. 隔震技术在建筑工程中的应用及发展趋势[J]. 建材发展导向(下), 2021, 19(3): 178-179.
DUAN Y F. Application and development trend of seismic isolation technology in construction engineering[J]. Development Guide to Building Materials, 2021, 19(3): 178-179.
- [3] 李枫悦,周德源,钟玉成,等. 采用隔震加固技术的某医疗建筑抗震性能分析[J]. 结构工程师, 2021, 37(1): 167-176.
LI F Y, ZHOU D Y, ZHONG Y C, et al. Seismic performance analysis of an existing medical building strengthened by seismic isolation technology[J]. Structural Engineers, 2021, 37(1): 167-176.
- [4] 谭平,徐凯,刘晗,等. 村镇建筑新型简易隔震技术研究[J]. 工程力学, 2017, 34(z1): 233-238.
TAN P, XU K, LIU H, et al. Study of new seismic isolation technology for rural buildings[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(z1): 233-238.
- [5] 朱绪林,林明强,高蕊,等. 中国建筑结构减隔震技术应用研究进展[J]. 华北地震科学, 2020, 38(4): 86-91.
ZHU X L, LIN M Q, GAO R, et al. Research progress in the application of seismic isolation technology in China[J]. North China Earthquake Sciences, 2020, 38(4): 86-91.
- [6] 毛锐. 城市高层建筑立体绿化设计策略研究[J]. 城市住宅, 2021, 28(2): 173-174.
MAO R. Research on three-dimensional greening design strategy of urban high-rise buildings[J]. City & House, 2021, 28(2): 173-174.
- [7] 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(2016年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [8] MANO T, MANGERIG I. Tensile load-carrying behaviour of elastomeric bearings[J]. Steel Construction, 2015, 8(1). DOI: 10.1002/stco.201510009.
- [9] 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.
- [10] 刘亚东,田杰. 橡胶隔震支座拉伸性能试验研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(7): 63-67, 79.
LIU Y D, TIAN J. Experimental study on tension property of isolation bearing[J]. Building Science, 2015, 31(7): 63-67, 79.
- [11] 许强. 橡胶隔震支座的拉剪力学模型及抗拉支座的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
- [12] 金建敏,冯德民,谭平,等. 隔震支座拉伸刚度及高层隔震建筑地震响应研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(3): 177-182.
JIN J M, FENG D M, TAN P, et al. Study on tensile stiffness of

- isolator and earthquake responses of isolated high-rise buildings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35 (3): 177-182.
- [13] 韩强, 杜修力, 刘文光, 等. 橡胶隔震支座拉伸性能试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32 (3): 208-212.
- HAN Q, DU X L, LIU W G, et al. Experimental research on tension property of rubber isolators[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32 (3): 208-212.
- [14] 陈鹏, 周颖, 刘璐, 等. 橡胶隔震支座抗拉装置受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38 (7): 113-119.
- CHEN P, ZHOU Y, LIU L, et al. Experimental research on mechanical performance of tension-resistant device for rubber bearings[J]. Journal of Building Structures, 2017, 38 (7): 113-119.
- [15] 苗启松, 卜龙瑰, 閻东东, 等. 隔震建筑支座抗拉问题研究与应用[J]. 建筑结构, 2019, 49 (18): 13-18, 4.
- MIAO Q S, BU L G, GE D D, et al. Research and application of tensile problem for building isolated bearing[J]. Building Structure, 2019, 49 (18): 13-18, 4.
- 收稿日期: 2021-11-02

Study on Tensile Properties of Isolation Rubber Bearing

LI Shiyao, LU Hao, ZHAO Qingbing, ZHAO Chenxu, ZHOU Jiexiao, WU Jianwei, WANG Xianbin, ZHU Enlai
(Quakesafe Technologies Co. Ltd, Kunming 650041, China)

Abstract: Based on the shortcoming of insufficient vertical tensile capacity of the isolation rubber bearing, the tensile properties and post-stretching mechanical properties of the isolation rubber bearing were experimentally studied. The results showed that the yield tensile stress of the bearing could reach 2.0~2.7 MPa according to the shear modulus of the compound, the ultimate tensile stress was about 5 MPa, and the ultimate tensile strain was about 350%. After uniaxial tension, the conventional mechanical properties of the bearing changed little, and the vertical compression limit and horizontal shear limit properties of the bearing could be well maintained, demonstrating good functionality and safety.

Key words: isolation rubber bearing; tensile property; yield tensile stress; ultimate tensile stress

专利2则

由惠州市三石精工实业有限公司申请的专利(公布号 CN 113618962A, 公布日期 2021-11-12)“一种旧橡胶片回收处理方法”, 涉及的旧橡胶片回收处理设备包括箱体、进料口、展平切割部件、清洗部件、破碎过滤部件、破碎整粒部件、分类部件和出料口。其中, 箱体一侧靠近上端设有进料口, 进料口后侧设置的展平切割部件对旧橡胶片进行展平、挤压及分层切割; 展平切割部件下方设置的清洗部件对外层橡胶进行清洗; 清洗部件外围设置的破碎过滤部件对橡胶进行破碎、风干、除杂; 破碎过滤部件外围设置的破碎整粒部件对橡胶进行二次破碎整粒以防堵; 破碎整粒部件下方设置的分类部件对橡胶进行分类、均匀下料、存储; 箱体向进料口方向一侧靠近下端设有出料口, 进料口的内滑动设有滑动进口, 出料口的内滑动设有滑动出口。

由山东星宇手套有限公司申请的专利(公布号 CN 113698677A, 公布日期 2021-11-26)“一种阻燃橡胶手套及其制备方法”, 提供了一种阻燃橡胶手套的制备方法, 包括: (1) 将分散剂、乳化剂、水、阻燃剂(氢氧化铝、氢氧化镁、包覆红磷、改性聚磷酸铵、季戊四醇、三聚氰胺、膨胀石墨中的1种或2种以上)按比例混合, 搅拌并配合超声分散, 得到阻燃剂乳液; (2) 在100份胶乳中加入1~5份表面活性剂、0.5~2份硫化剂、1~5份促进剂A、1~3份促进剂B、40~80份阻燃剂乳液、0.5~2份活性剂、1~6份增稠剂并混合均匀, 得到含阻燃剂的胶乳; (3) 将棉手套坯或经凝固剂处理的针织手套坯浸渍含阻燃剂的胶乳; (4) 硫化制得阻燃橡胶手套。该阻燃手套具有高阻燃性、燃烧不产生有毒烟尘/气体, 同时具有良好的耐磨性能和灵巧性, 满足高温、高热环境的使用要求。

(本刊编辑部 赵敏)