

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.069

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



老化与偏心受压下板式橡胶支座抗震性能拟静力试验研究

黄海新¹, 李炫钢¹, 李帆¹, 张仲帆², 周彤²

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 中电建冀交高速公路投资发展有限公司, 石家庄 050000)

摘要:板式橡胶支座的的老化和偏压甚至脱空对桥梁抗震安全至关重要。将板式橡胶支座进行室内老化试验并测得弹性模量,按老化程度和轴压偏心大小共分16个工况,采用拟静力试验对比分析了热老化、偏压脱空及其耦合下支座的抗震性能指标及变化规律。结果发现:偏心受压下支座滞回曲线较为狭长,滞回曲线面积和等效阻尼比减小,水平等效刚度增大;老化后的支座剪切变形量缩减,在给定的位移幅值下,因滑移量占比加大,滞回曲线更为饱满,对应的等效阻尼比增大;老化和偏心耦合状态下的滞回曲线斜率更为平缓,支座耗能能力明显削弱;位于梁端或长期处于偏压状态的普通板式橡胶支座在地震中存在因单向累计滑移过大而脱落的风险。桥梁维护中应对支座底面采取限位措施,并对偏心受压严重的支座进行及时调整。

关键词:桥梁工程;减隔振性能;拟静力试验;橡胶支座;热老化;偏心受压

中图分类号:U441;TU317 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)03-0051-08

Pseudo static test of seismic performance of rubber bearing plate under aging and eccentric compression

HUANG Haixin¹, LI Xuangang¹, LI Fan¹, ZHANG Zhongfan², ZHOU Tong²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China;

2. Zhong Dian Jian Ji Jiao Expressway Investment Development Co., Ltd, Shijiazhuang 050000, P. R. China)

Abstract: The aging eccentric compression, and even void of plate rubber bearings are very important for the seismic safety of bridges. The elastic modulus of plate rubber bearing was measured by indoor aging test. According to the degree of aging and eccentric compression the quasi-static test is divided into 16 cases, and the seismic performance indexes and change rules of the bearings under thermal aging, eccentric pressure and coupling are compared and analyzed. The results show that the hysteresis curve of the bearings under eccentric compression is relatively narrow. The area and equivalent damping ratio of the hysteresis curve decrease, and the horizontal equivalent stiffness of bearing increases. After aging, the shear deformation of the bearings decreases, the hysteresis curve is fuller with the increase of slip ratio for the given displacement amplitude, and the corresponding equivalent damping ratio increases. Under the condition of aging and eccentric compression, the slope of hysteresis curve is more gentle, and the energy

收稿日期:2020-03-10

基金项目:国家重点研发计划(2017YFE0103000);天津市交通运输科技发展计划(2018-35);河北省交通运输厅科技项目(TH-201916)

作者简介:黄海新(1976-),男,博士,教授,主要从事桥梁设计和维护研究,E-mail:hxxhebut@126.com.

Received:2020-03-10

Foundation items:National Key R & D Program of China (No. 2017YFE0103000); Technology Development Program of Tianjin Transportation (No. 2018-35); Science and Technology Program of Transportation Department of Hebei (No. TH-201916)

Author brief:HUANG Haixin (1976-), PhD, professor, main research interests: bridge design and maintenance, E-mail: hxxhebut@126.com.

dissipation capacity of bearing is obviously weakened. It is found that the beam end or the common plate rubber bearing that is under eccentric compression for a long time has the risk of falling off due to the excessive unidirectional accumulative slip in earthquake. It is suggested that in bridge maintenance, a limit device should be set on the underside of the bearing and timely adjust the bearing with severe eccentric compression.

Keywords: bridge engineering; damping performance; pseudo static test; rubber bearing; thermal ageing; eccentric compression

板式橡胶支座以其成本低、承载和变形能力优良而在中小跨径梁桥中被广泛应用。在桥梁减隔震设计中,板式橡胶支座因较小的阻尼比而通常被视为普通支座。但近二三十年的地震灾害表明,板式橡胶支座的剪切变形、摩擦滑移耗散了部分能量,减轻或延缓了桥墩的损伤^[1]。因此,一些学者开始对板式橡胶支座的减隔震性能进行深入研究。其中,范立础等^[2-3]、王东升等^[4]较早对活动板式橡胶支座的动力性能进行研究,汶川地震后,板式橡胶支座的抗震性能从振动台试验、拟静力试验和数值模拟等方面得到了进一步探索^[5-8], Kelly 等^[9]、Steelman 等^[10-11]近年来也颇为重视地震作用下普通橡胶支座的性能特点及隔震机理,但上述研究均是在支座无病害的情况下进行的。实际工作中,由于工程因素与自然因素等原因,板式橡胶支座随着服役时间的增长不可避免地会出现老化、偏压脱空等病害^[12],而这些病害是否会对支座的抗震性能造成影响,少数学者进行了初步探索。施卫星等^[13]对叠层橡胶支座进行了拟静力试验,研究加载频率、剪切变形率、热老化对叠层橡胶支座的等效刚度、等效阻尼比等支座动态性能的影响。张子翔^[14]采用仅能覆盖支座表面一部分的竖向加载板来模拟支座脱空,进而通过拟静力试验探究其恢复力特性。

可见,带病害板式橡胶支座抗震性能分析目前仅针对单一的老化或脱空状况,且研究尚不充分,而考虑两种病害并存状态下的研究尚未见报道。为此,笔者以无老化、支座老化、偏压脱空及两种病害耦合的支座为研究对象,以水平等效刚度、水平滑移量、等效阻尼比为指标,采用拟静力试验较为系统地对比分析了无老化支座与带病害支座的抗震性能,分析其变化规律,为在役公路梁桥的性能评估及抗震加固提供依据。

1 老化与偏心下支座拟静力试验设计

1.1 试件及主要试验设备

板式橡胶支座试件型号为 GYZ250×41,其详

细参数见表 1。将支座按 4 块一组,依据老化时间共分为 4 组,分别为无老化、老化 1、老化 2、老化 3。其中,老化 1、老化 2、老化 3 组为在老化箱中 100 ℃ 下分别放置 24、60、72 h,其对应的实际老化年限依据国家标准《硫化橡胶或热塑性橡胶应用阿累尼乌斯图推算寿命和最高使用温度》^[15],由阿累尼乌斯(Arrhenius)公式可推算得到

$$\ln(t_1) - \ln(t_s) = \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_s} \right) \quad (1)$$

式中: t_1 、 T_1 为老化时间与相应温度; t_s 、 T_s 为实际使用时间及温度; R 为摩尔气体常数; E_a 为活化能。

表 1 板式橡胶支座各规格参数

Table 1 Specification parameters of laminated rubber bearing

试件规格	d /mm	S	t /mm	t_e /mm	t_1 /mm	t_0 /mm
GYZ250×41	250	7.5	41	29	8	3

已有研究表明,在老化反应温度变化不大时,活化能可视为常数^[15-16],则式(1)等号右侧为定值, t_1 与 t_s 间呈线性关系,结合文献[13]换算可得老化 1、老化 2、老化 3 分别对应实际老化年限约为 4.2、10.5、12.6 a。测得各组支座的抗压弹性模量,取平均值列于表 2。表中 d 为直径, S 为形状系数, t 为支座总厚度, t_e 为橡胶层总厚度, t_1 为中间层橡胶厚度, t_0 为单层钢板厚度。

表 2 不同老化程度支座的弹性模量

Table 2 Elastic modulus of bearing with different aging time

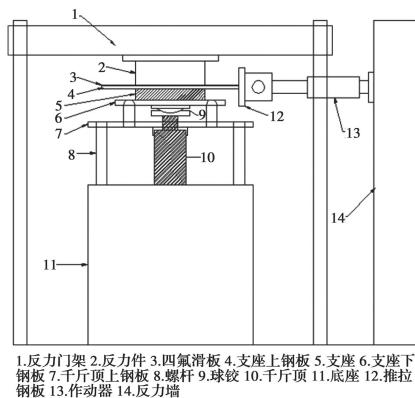
MPa			
无老化	老化 1	老化 2	老化 3
37.450	37.769	41.546	46.443

由表 2 可见,板式橡胶支座的抗压弹性模量随老化程度加剧而增大,这与文献[17]所述一致。

主要试验设备有门式反力钢架 1 套、25 t 作动器及配套记录系统、30 t 千斤顶和钢构件及配套螺杆、四氟滑板、位移传感器和数据采集仪。

1.2 试验装置设计

竖向和水平加载试验装置设计如图1(a)所示。其中,支座竖向力由位于下方的千斤顶施加,具体为千斤顶活塞穿过千斤顶上钢板中间的预设圆孔施加于球铰,进而将压力传递给支座,支座在反力件和反力门架的约束下竖向受压。水平加载由水平放置的作动器施加,作动器以反力墙为支撑,通过推拉钢板对支座施加水平力。推拉钢板上表面与反力件间设置四氟滑板,便于其水平往复运动,而推拉钢板下表面与支座顶面直接接触,这与实际工程中支座表面所受梁底一般性接触约束的边界条件相一致。同时,在水平向设置位移传感器用于采集推拉钢板和支座上下端的位移值。组装完成后的试验装置照片见图1(b)。



(a) 试验装置构造示意图



(b) 试验装置照片

图1 试验装置图

Fig. 1 Test device

2 试验过程及结果

千斤顶施加的竖向荷载参考百花大桥作用于支座上的压强^[18],经计算确定试验加载力为214 kN。竖向荷载稳定后由作动器采用位移控制进行低频水平加载,加载位移的幅值参考《城市桥梁检测与评定技术规范》^[19]并结合试验装置尺寸取大于极限应变的35、40 mm,每个幅值加载3个循环。每个支座的

加载为一个工况,共16个工况,具体见表3。支座剪切变形和偏压脱空如图2和图3所示,水平加载时由采集仪记录数据。图4给出了各工况的滞回曲线。

表3 加载工况

Table 3 Loading cases

偏心距/cm	无老化	老化1	老化2	老化3
0	工况1	工况5	工况9	工况13
5	工况2	工况6	工况10	工况14
7.5	工况3	工况7	工况11	工况15
10	工况4	工况8	工况12	工况16



图2 支座剪切变形

Fig. 2 Shear deformation of bearing



图3 偏压脱空

Fig. 3 Eccentric compression of bearing

3 结果分析

3.1 滞回曲线图特征及初步分析

观察发现,图4中各种不同工况下的滞回曲线均存在两个共性特征。其一,当水平力卸载为0时,滞回曲线在水平坐标上的截距并不为0,该数值应为支座与顶底板间的相对滑移量。推定的理由是因决定支座变形的橡胶为超弹性体,在卸载后其不会存在残余变形,故往复运动中支座与钢板间势必出现相对滑移,这一点在实验中也观察到。其二,就图中首个正向加载段曲线而言,斜率初期远大于后

期,可见加载初期支座位移值应是静摩擦力对应的水平变形,而后出现明显拐点,斜率相对变缓但并不为零,且随着位移的加大,水平力仍在增长,表明滑

移出现,但此时的位移值并非单纯的由支座滑动贡献,必然含有支座自身的剪切变形,即支座滑动与变形并存。

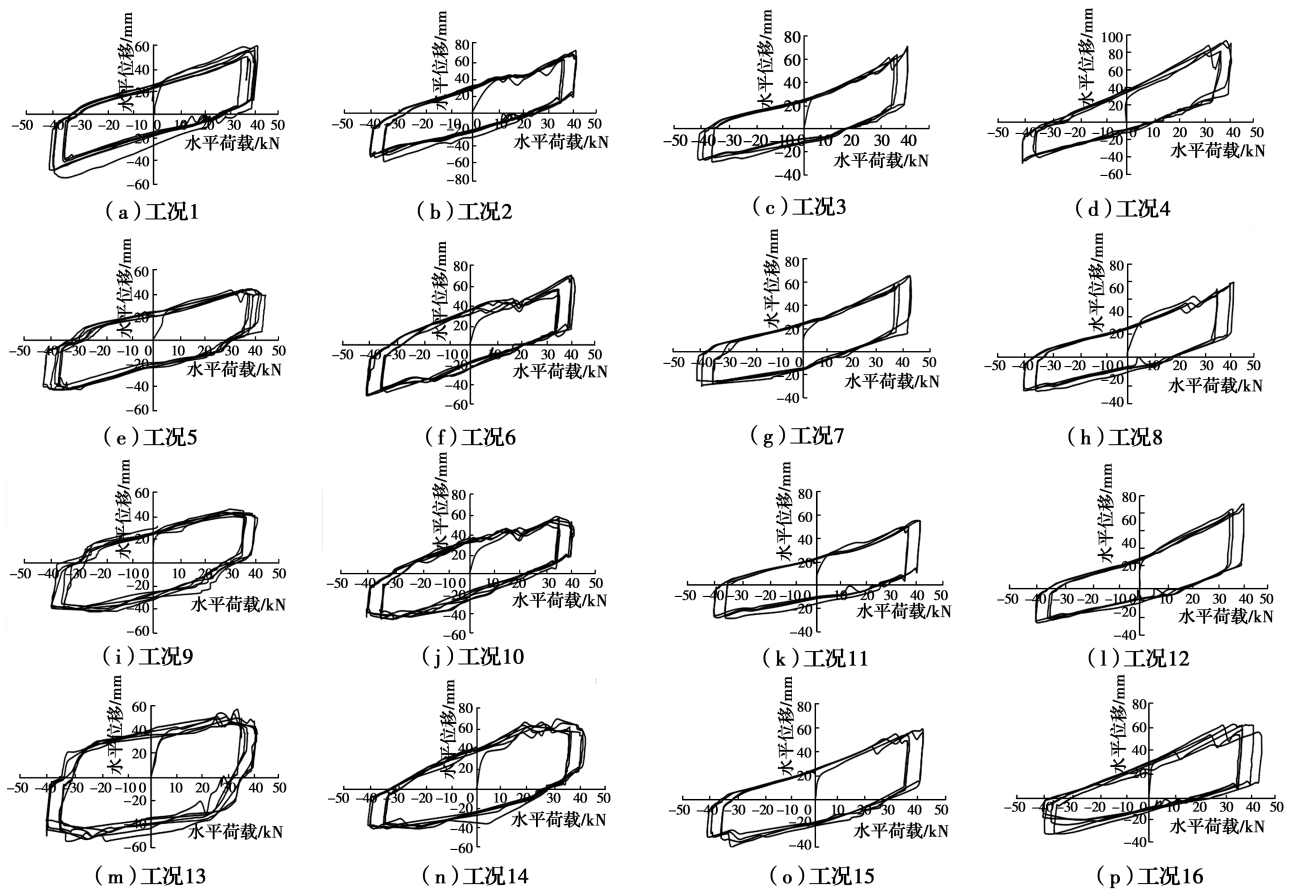


图 4 各工况滞回曲线

Fig. 4 Hysteresis curves of each case

对比图 4(a)、(d)可见,支座仅偏心受压时,滞回曲线更加狭长,曲线斜率较大,支座滑移量变小而变形量增大。同时,正负峰值荷载相较于无偏心工况,一个相对变大,另一个相对变小,说明在往复方向的加载过程中支座的受力状况并不一致。工况 1 和工况 13 相比,仅老化后的支座滞回曲线更加饱满,曲线斜率较小,滑移量更大,变形量缩减明显,且正负峰值荷载的绝对值略有降幅。而当老化和偏心耦合时,除体现上述单因素特征外,从图 4(p)中还可以看出,随着水平加载进行,曲线斜率、峰值荷载皆逐渐减小,在往复方向运动中,支座的滑移量差异较大。

综上所述,支座老化和偏心距对滑移量、变形、荷载峰值均产生了影响。下面针对具体抗震性能指标作进一步分析。

3.2 水平等效刚度

选取各工况所得滞回曲线中的数据,提取峰值

点按式(2)计算,获得中心加载与偏心加载下不同老化程度支座的水平等效刚度,如图 5 所示。

$$K = \frac{|+F_i| + |-F_i|}{|+X_i| + |-X_i|} \quad (2)$$

式中: K 为水平等效刚度; F_i 为第 i 次峰值点荷载; X_i 为第 i 次峰值点位移。

由图 5 可见,随着热老化程度加剧,支座的水平等效刚度总体呈减小的趋势。与无偏心相比,轴压偏心的出现使支座的水平等效刚度增大。

探究偏心后支座水平等效刚度增大的原因,发现其与与推行程中支座变形呈现的新特征有关。如图 6 所示,当支座处于偏心受压状态时,下方钢板呈现一定偏转,此时 $h_1 < h_2$,即靠近水平作动器以适应偏心需求的支座,其上下钢板沿推的方向一侧竖向间距 h_1 减小,拉的方向一侧竖向间距 h_2 增大。在“推”行程时,支座运动空间逐渐变小,橡胶的不可压

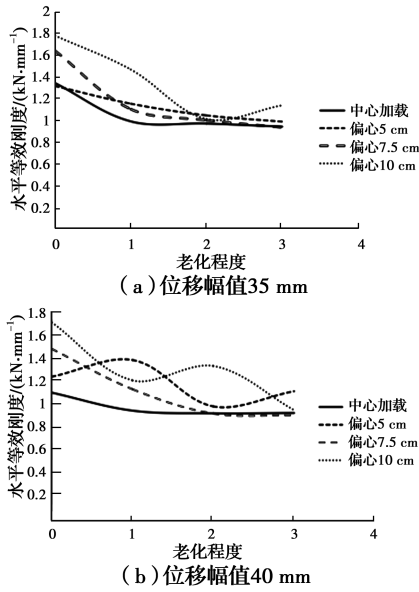


图 5 各工况下支座的水平等效刚度

Fig. 5 Equivalent horizontal stiffness of bearing under each working condition

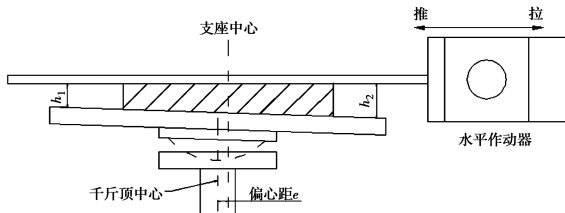


图 6 支座偏心受压示意图

Fig. 6 Diagram of eccentric compression of bearing

缩性使得支座竖向受到明显挤压,导致压力剧增,摩擦力增大,滑移困难,造成剪切变形加剧,使得对应的水平荷载增速加剧。反之,“拉”行程中,支座运动空间变大,竖向压力减小,相对变易的滑移弱化了剪切变形的需求,导致对应的水平荷载降低。支座水平变形“推”行程大于“拉”行程的这一特征也可从图 5(b)中得到证实。同时,由图 5(b)可见,偏心受压下滞回曲线中“推”对应的峰值荷载增加量大于“拉”对应的峰值荷载减小量,故偏心受压下的支座水平等效刚度得到提升。

3.3 支座滑移量

提取位移计记录,结合滞回曲线在试验所设位移幅值下各往复循环中支座的滑移数据,经均值处理可得各工况支座的滑移量,如图 7 所示。

由图 7 可知,支座的滑移量随热老化和偏心的变化规律与图 5 一致,不再赘述。分析其原因:随老化加剧,支座的水平剪切模量增大,所需水平变

形值降低,相应的滑移量自然增大。而当支座偏心受压时,“推”行程的吃力使得滑移陡减,滑移数值变小。

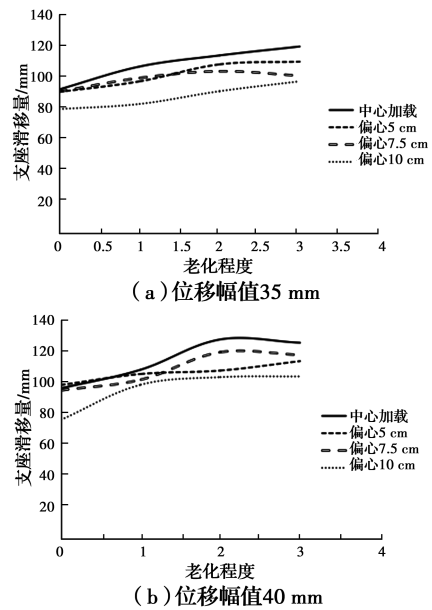


图 7 各工况支座的水平滑移量

Fig. 7 Horizontal sliding results of bearing under each case

此外,为观察支座在经过水平往复荷载后的相对位置是否发生改变,试验中,在各工况的始末还分别测量了支座一端至固定参考点的水平距离,以偏向拉方向为正,结果如图 8 所示。由图 8 可见,无偏心时,支座相对位置变化很小,尤其是老化程度的改变对其影响甚微,但当轴载发生偏心时,支座的相对位置却有明显变化,且呈现不可逆的统一向竖向压力相对较小的一方滑移的特征。据此可推测,对位于简支梁桥、连续梁桥端部处于偏压即使未发生脱空的普通板式橡胶支座而言,支座边缘与梁端的距离中小跨径梁桥参考相关规范基本在 20 cm 左右^[20],而板式橡胶支座的正常使用寿命一般在 20 a,

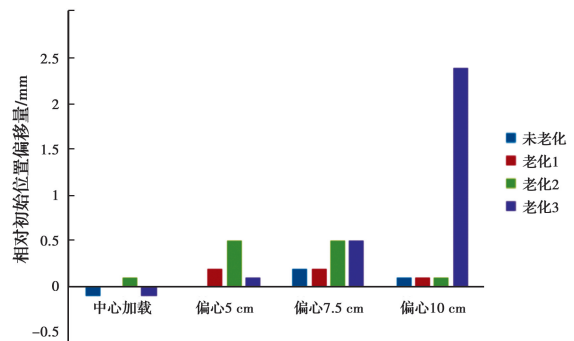


图 8 各工况末支座相对初始位置偏移量

Fig. 8 Offset of bearing relative to initial position

如此长服役期内的单向累计滑移易超出支座梁端限值,支座脱落会危及桥梁结构的抗震安全,甚至导致落梁,故建议桥梁维护中对支座底面应采取限位措施。

3.4 耗能能力

图 9 给出了基于滞回曲线数据、利用 MATLAB 得到的滞回曲线面积,据此,采用等效阻尼比公式(3)计算出各工况阻尼参数,结果如图 10 所示。

$$\xi = \frac{S}{\pi \cdot (F_1 \cdot l_1 + F_2 \cdot l_2)} \quad (3)$$

式中: ξ 为等效阻尼比; S 为滞回曲线面积; F_1 、 l_1 为符号为正的峰点荷载值和位移值; F_2 和 l_2 为符号为负的峰点荷载值和位移值。

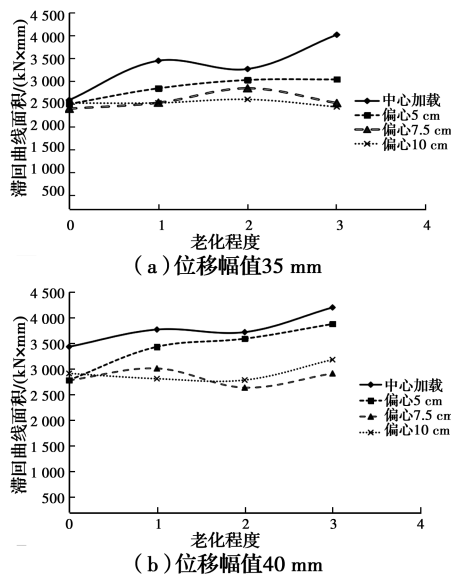


图 9 各工况滞回曲线面积

Fig. 9 Hysteresis curve area of each case

由图 9 可见,滞回曲线面积计算结果随热老化程度加剧虽有一定波动,但整体基本呈增大趋势,随竖向偏心距增大而总体下降。滞回曲线面积代表在往复运动中消耗的总能量,支座耗能可分为两部分,一部分为其自身变形耗能,另一部分为摩擦滑移耗能。对比两部分耗能曲线面积,可知板式橡胶支座以摩擦耗能为主,其变形耗能相对较小,而摩擦耗能由摩擦力与滑移量决定。由此可知,随着热老化程度加剧,支座在水平往复运动中的摩擦力减小、滑移量增大,而随着竖向偏心距增大,其情况相反,再结合滞回曲线总面积的变化,可见在当前的位移幅值下,摩擦耗能主要由滑移量决定。

图 10 中支座等效阻尼比的变化规律与图 9 基

本相似。由式(3)可知,在采用位移控制的拟静力试验中,滞回曲线面积与摩擦力共同决定支座的等效阻尼比。结合图 4 及前文所述,在一定位移幅值内,随老化程度加剧滞回曲线面积增大,而摩擦力减小,所以等效阻尼比增大。当老化程度一定,轴载偏心距变大时,滞回曲线面积减小,水平等效刚度增大,说明正负峰值荷载绝对值之和增大,所以,等效阻尼比减小。

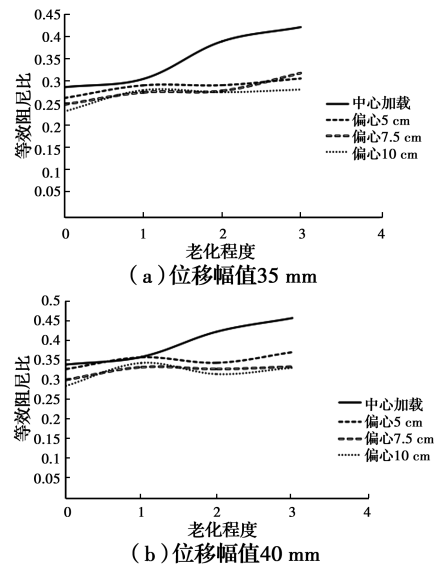


图 10 各工况等效阻尼比

Fig. 10 Equivalent damping ratio of each case

此外,由图 9 和图 10 可见,各老化程度下,当支座处于偏心受压状态时,其耗能能力下降都非常明显。因此,桥检中严重的偏压状态应引起足够的重视,其会削弱结构在地震作用下的安全性。

4 结论

1) 板式橡胶支座偏心受压时,滞回曲线面积和等效阻尼比均缩减,支座耗能能力相对降低。

2) 支座热老化后,滞回曲线面积和等效阻尼比增大,但与偏心受压状态耦合后,支座耗能能力降幅更为明显。

3) 板式橡胶支座自身的变形耗能相对较小,减震中可适当发挥其滑移摩擦耗能的能力。

4) 偏心过大甚至局部脱空的板式橡胶支座在地震中极易因单向累计滑移过大而脱落,进而降低结构的抗震安全性,建议桥梁管养中应重视对梁端或长期处于偏压状态支座的维护,其底面可采取适当限位措施。

参考文献:

- [1] 贺存哲, 薛刚. 板式橡胶支座抗震性能研究综述[J]. 江西建材, 2019(5): 7-9.
HE C Z, XUE G. An overview of research on seismic performance of plate rubber bearings [J]. Jiangxi Building Materials, 2019(5): 7-9. (in Chinese)
- [2] 范立础, 袁万城. 桥梁橡胶支座减、隔震性能研究[J]. 同济大学学报, 1989, 17(4): 447-455.
FAN L C, YUAN W C. Seismic isolation and energy absorption properties of elastomeric pad bearing for bridges [J]. Journal of Tongji University, 1989, 17(4): 447-455. (in Chinese)
- [3] 范立础, 聂利英, 李建中. 地震作用下板式橡胶支座滑动的动力性能分析[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 30-35.
FAN L C, NIE L Y, LI J Z. Dynamic characteristic analysis of laminated rubber bearing sliding under earthquake [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(4): 30-35. (in Chinese)
- [4] 王东升, 冯启民. 活动支座摩擦力对简支梁桥地震反应的影响[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(4): 30-39.
WANG D S, FENG Q M. Effects of frictional force at movable supports on earthquake response of simply supported reinforced concrete bridges [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(4): 30-39. (in Chinese)
- [5] 范立础, 李建中. 汶川桥梁震害分析与抗震设计对策[J]. 公路, 2009, 54(5): 122-128.
FAN L C, LI J Z. Earthquake damage analysis and seismic design countermeasure of Wenchuan bridge [J]. Highway, 2009, 54(5): 122-128. (in Chinese)
- [6] 李冲, 王克海, 李悦, 等. 板式橡胶支座摩擦滑移抗震性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(1): 162-167.
LI C, WANG K H, LI Y, et al. Experimental study on seismic performance of laminated rubber bearings with friction slipping [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(1): 162-167. (in Chinese)
- [7] 李涵, 周应新, 钱正富, 等. 山区公路桥梁高性能板式减震橡胶支座振动台试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(9): 1244-1251.
LI H, ZHOU Y X, QIAN Z F, et al. Shaking table tests on high-performance isolation rubber bearing isolated highway bridge in mountainous area [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(9): 1244-1251. (in Chinese)
- [8] 鲁小罗, 徐略勤, 李钟雄, 等. 典型连续梁桥考虑板式橡胶支座滑移的抗震性能对比研究[J]. 结构工程师, 2019, 35(1): 131-139.
LU X L, XU L Q, LI Z X, et al. Comparative study on the seismic performance of typical continuous bridges considering the sliding effects of laminated rubber bearings [J]. Structural Engineers, 2019, 35(1): 131-139. (in Chinese)
- [9] KELLY J M, KONSTANTINIDIS D A. Mechanics of rubber bearing for seismic and vibration isolation [M]. John Wiley & Sons Ltd., 2011: 178-184.
- [10] FILIPOV E T, HAJJAR J F, STEELMAN J S, et al. Computational analyses of quasi-isolated bridges with fusing bearing components [C]//Proceedings of the ASCE/SEI Structures Congress, Reston, VA, USA, 2011: 276-288.
- [11] STEELMAN J S, FAHNESTOCK L A, LA FAVE J M, et al. Seismic response of bearings for quasi-isolated bridges testing and components modeling [M]//Structures Congress, 2011: 164-178.
- [12] 刘利. 在役公路桥梁板式橡胶支座病害分析及对策研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2012.
LIU L. Study on disease analysis and coping strategies of the plate type elastomeric pad bearings for highway bridges in service [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2012. (in Chinese)
- [13] 施卫星, 李正升. 一种叠层橡胶支座动态性能试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1999, 27(4): 417-421.
SHI W X, LI Z S. Test study on dynamic behavior of laminated rubber bearings [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 1999, 27(4): 417-421. (in Chinese)
- [14] 张子翔. 考虑竖向力效应的叠层橡胶支座力学模型及隔震结构地震响应分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
ZHANG Z X. Theoretical modeling of elastomeric isolation bearings and seismic response analysis of its superstructure including vertical load effects [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [15] 谢宇芳. 正确理解国家标准《硫化橡胶或热塑性橡胶应

- 用阿累尼乌斯图推算寿命和最高使用温度》[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2006, 26(10): 11-18.
- XIE Y F. Correctly understand the national standard *Life and Maximum Service Temperature of Vulcanized Rubber or Thermoplastic Rubber Calculated by Arrhenius Diagram* [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2006, 26(10): 11-18. (in Chinese)
- [16] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- ZHOU F L. *Vibration control of engineering structure* [M]. Beijing: Seismological Press, 1997.
- [17] 王树芝. 铁路板式橡胶支座失效条件和使用寿命的研究[J]. 铁道建筑, 2003, 43(7): 26-29.
- WANG S Z. Determination of failure condition for plate elastomeric bearings used on railway bridge and its lifespan [J]. Railway Engineering, 2003, 43(7): 26-29. (in Chinese)
- [18] 李瑞. 板式橡胶支座本构试验及抗震性能研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2016.
- LI R. Constitutive experiment and seismic performance researches of laminated rubber bearings [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, 2016. (in Chinese)
- [19] 城市桥梁检测与评定技术规范: CJJ/T 233—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 23-24.
- Technical code for test and evaluation of city bridges: CJJ/T 233-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 23-24. (in Chinese)
- [20] 公路圬工桥涵设计规范: JTG D 61—2005 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 24-25.
- Code for design of highway masonry bridges and culverts: JTG D 61-2005 [S]. Beijing: China Communications Press, 2005: 24-25. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)