

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202111016

## 海蚀环境下考虑摩擦滑移的桥梁板式橡胶支座 老化剪切性能研究\*

李悦<sup>1</sup>, 高崇铭<sup>1</sup>, 李冲<sup>2</sup>, 李茜<sup>3</sup>, 黄帅<sup>4</sup>, 王克海<sup>3</sup>

(1. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144; 2. 中交公路长大桥建设国家工程研究中心有限公司, 北京 100088;  
3. 交通运输部公路科学研究所, 北京 100088; 4. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085)

**摘要:** 板式橡胶支座作为海蚀环境中桥梁结构体系中的重要支撑构件, 其摩擦滑移与橡胶老化会影响桥梁结构整体的抗震性能。为了探究海蚀环境下考虑摩擦滑移的桥梁板式橡胶支座老化剪切性能, 开展了板式橡胶支座的摩擦滑移试验, 并采用有限元方法, 分析了橡胶老化对各形状系数的板式橡胶支座的剪切性能和摩擦滑移的影响。结果表明: ①支座的摩擦滑移起始位移随着老化时间的增长和形状系数的增大而不断变大; ②随着老化时间的增加, 支座通过摩擦滑移消耗的能量也会逐渐增多; ③支座的等效黏滞阻尼比随着老化时间和形状系数的增加而变大。海蚀环境会加速板式橡胶支座的老化并影响其剪切性能, 因此在海蚀较为严重的地区进行桥梁抗震设计时应考虑支座摩擦滑移及老化对桥梁地震动力响应的影响。

**关键词:** 板式橡胶支座; 海蚀环境; 摩擦滑移; 橡胶老化; 剪切性能

**中图分类号:** U443; U361 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)02-0340-07

## Research on the Aging Shear Performance of Plate Rubber Bearings in Bridges Considering Frictional Slip in Marine Corrosion Environment

LI Yue<sup>1</sup>, GAO Chongming<sup>1</sup>, LI Chong<sup>2</sup>, LI Qian<sup>3</sup>, HUANG Shuai<sup>4</sup>, WANG Kehai<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China;  
2. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100088, China;  
3. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China;  
4. National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of P.R. China, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Plate rubber bearing is an important supporting member in the bridge structure system in the marine corrosion environment. The frictional slip and rubber aging will affect the overall seismic performance of the bridge structure. To investigate the aging shear performance of bridge plate rubber bearing considering frictional slip under the marine corrosion environment, the frictional slip test on the plate rubber bearing was carried out, and the effect of rubber aging on the shear performance and frictional slip of the plate rubber bearings with various shape factors was analyzed by the finite element method. The results show that: (1) The initial frictional slip of the bearing increases with the increase

\* 收稿日期: 2021-09-02; 修回日期: 2021-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408009)、北京市属高校基本科研业务费项目(110052971921/062)、北方工业大学毓优人才支持计划(XN012/044)资助

作者简介: 李悦(1979—), 男, 副教授, 博士(后), 硕导。主要从事工程结构以及桥梁的抗震减灾研究。

Email: liyue@ncut.edu.cn

of aging time and the shape factor; (2) The energy consumed by the bearing through frictional slip gradually increases with the aging time; (3) The equivalent viscous damping ratio of the bearings increases with the aging time and the shape factor. Marine corrosion environment will accelerate the aging of the plate rubber bearing and affect its shear performance, so the influence of bearing frictional slip and aging performance on the seismic dynamic response of bridges should be considered in the seismic design of bridges in areas with more serious marine corrosion environment.

**Keywords:** plate rubber bearing; marine corrosion environment; frictional slip; rubber aging; shear properties

## 引言

随着沿海公路基础设施的广泛建设,板式橡胶支座在沿海桥梁中应用广泛<sup>[1]</sup>。在海蚀环境和运营荷载耦合作用下,板式橡胶支座存在钢板锈蚀、橡胶老化等问题<sup>[2]</sup>。同时,中、小跨径桥梁上板式橡胶支座通常是直接搁置在上、下部结构之间,不采取任何锚固措施。而这类无锚固支座在地震作用下易产生较大剪切变形及摩擦滑移,可有效释放上部结构地震力,保护下部结构<sup>[3]</sup>。如2008年汶川地震中,VII~XI度区域内简支梁桥的2316个桥墩中,仅56个桥墩出现震害,震害率为2.4%,而支座破坏率达到16.6%,其中绝大部分为板式橡胶支座<sup>[4]</sup>。

由于板式橡胶支座在桥梁中应用广泛,国内外学者对地震作用下板式橡胶支座的力学性能进行了大量研究。J. McDonald等<sup>[5]</sup>分析了竖向力、支承面粗糙度、滑动速度等因素对橡胶支座与支承构件间的摩擦滑移特性的影响。D. Konstantindis等<sup>[6]</sup>通过试验研究了上下面均未锚固的板式橡胶支座的剪切性能,结果表明支座的剪应变达到150%~250%后,支座将发生滑移。汤虎等<sup>[7-8]</sup>对采用板式橡胶支座的简支梁桥进行了振动台试验研究,结果证实支座的摩擦滑移具有一定的隔震效果,但同时也增加了落梁的风险。另外,Y. Itoh等<sup>[9]</sup>通过开展近海环境下橡胶材料的耐久性研究,发现盐雾、酸雾、紫外线辐射对橡胶力学性能均有不同程度的影响。K. Ab-Malek<sup>[10]</sup>对浸泡在海水中约42年的橡胶材料进行力学性能的测试,发现橡胶的力学性能发生了退化。Yoshito等<sup>[11]</sup>对橡胶块进行了耐久性试验,发现海洋环境对橡胶块的力学性能有较大的影响。此外,M. Kato等<sup>[12]</sup>对Pelham大桥上使用了40年左右的橡胶支座的力学性能进行试验研究,发现支座的水平刚度增加约10%。Y. Takenaka等<sup>[13]</sup>,

H. S. Gu等<sup>[14]</sup>,H. Chou等<sup>[15]</sup>分别从热老化、紫外线辐射、海水腐蚀等单一的海洋环境因素对橡胶支座的性能劣化规律进行了研究。结果表明,海蚀环境会加速橡胶的老化,进而导致橡胶支座力学性能退化,严重影响橡胶支座的服役时间和减隔震性能。

上述研究表明,支座的摩擦滑移与橡胶老化影响桥梁在地震作用下的动力响应。鉴于既有研究多集中在板式橡胶支座摩擦滑移和海蚀环境中橡胶材料或支座的力学性能等方面,对海蚀环境下考虑摩擦滑移的桥梁板式橡胶支座老化剪切性能的研究较少。因此,开展板式橡胶支座的往复荷载试验,并采用有限元分析方法,以橡胶材料老化性能理论为基础,对海蚀环境下板式橡胶支座的摩擦滑移起始位移、剪切变形、耗能、等效黏滞阻尼比等参数进行分析,探究橡胶材料老化对支座剪切性能的影响,以期对海蚀地区的桥梁抗震设计提供参考。

## 1 橡胶老化后支座力学性能的计算

1940年,R. Mooney<sup>[16]</sup>提出了基于应变能函数的橡胶弹性大变形理论,并假设:(1)橡胶是各向同性,且不可压缩( $0.48 \leq \mu \leq 0.5$ )的超弹性体;(2)橡胶在剪切变形及垂直于单向拉伸或压缩轴的平面内叠加剪切时遵循虎克定律。基于此,获得了橡胶应变能函数表达式<sup>[17-19]</sup>:

$$W = C_{10}(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_{01}(\lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} - 3) \quad (1)$$

式中, $\lambda_1, \lambda_2$ 和 $\lambda_3$ 为橡胶立方体各边伸长率, $C_{10}, C_{01}$ 为橡胶材料正定常数。

R. S. Rivlin<sup>[20]</sup>从数学角度出发,考虑了应变能函数可采取的一般形式,获得了应变不变量的一般表达式:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

根据橡胶材料的不可压缩性或变形时的体积不变性,引入关系式  $I_3=1$ ,使得三个应变不变量中只有两个是独立的,即:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中  $I_1, I_2$  的大小由三个主轴的拉伸比决定。因此对应于各向同性不可压缩材料的应变能函数  $W$ , 可以用  $W = (I_1, I_2, I_3)$  来描述。则 Mooney 的橡胶应变能函数可以表示为:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (4)$$

式(4)就是工程上被广泛应用于弹性体变形研究中的 Mooney-Rivlin 模型,其能够体现橡胶材料的力学性能。

然而,在沿海桥梁工程中,由于支座长期处于复杂和恶劣的海洋环境中,老化现象极其严重。基于橡胶材料热老化试验研究,可以获得老化作用下橡胶材料的 Mooney-Rivlin 模型材料常数  $C_{10}$  和  $C_{01}$  的时变规律<sup>[21-22]</sup>,如式(5)和(6)所示,进而获得材料常数随时间的变化规律曲线,如图1所示。

$$C_{10} = 0.0015n + 0.4054 \quad (5)$$

$$C_{01} = 0.0004n + 0.2165 \quad (6)$$

式中,  $n$  为实际橡胶老化时间,以年为单位。

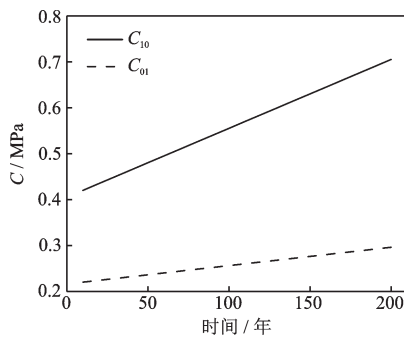


图1  $C_{10}, C_{01}$  变化规律曲线

Fig.1 Trend curves of  $C_{10}$  and  $C_{01}$

## 2 板式橡胶支座剪切性能试验研究

由于中小跨径桥梁往往采用活放的板式橡胶支座,支座与梁体间缺少有效连接,因此开展考虑摩擦滑移的板式橡胶支座往复荷载试验,试验加载装置如图2所示,试验工况见表1。为研究海蚀环境下橡胶材料老化后板式橡胶支座的地震剪切性能提供试验支撑。

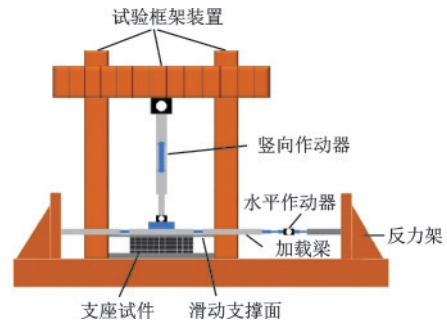


图2 试验装置示意

Fig.2 Testing setup elevation

表1 支座试验参数

Table 1 Test parameters of bearings

序号	橡胶层 总厚度/mm	形状系数	竖向荷载/ MPa
B-1	48	16.38	4
B-2	48	16.38	6
B-3	48	16.38	8
B-4	48	16.38	10

注:支座满足《公路桥梁板式橡胶支座》<sup>[23]</sup>和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》<sup>[24]</sup>的要求

为了再现支座的工作状态,在恒定竖向荷载作用下,通过上封板把支座顶面与加载装置锚固,对支座施加水平往复荷载,支座底面橡胶层在支承面上产生摩擦,加载过程中试件的变形如图3所示。试验时,采用支座等效剪切应变作为单次循环加载位移。

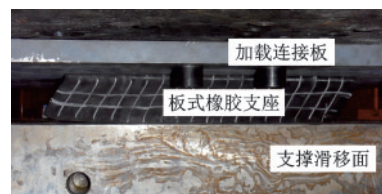


图3 支座摩擦滑移试验

Fig.3 Frictional slip test of the specimen

试验表明,随着加载位移的增加,静摩擦力不断增大,直至达到滑动摩擦力时,支座开始滑移,支座摩擦力  $F_m$  与加载位移  $\Delta$  的关系如图4所示。摩擦系数与支座压应力呈现反比例关系如图5所示,当竖向压力由 4 MPa 增大至 10 MPa 时,摩擦系数则由 0.31 降至 0.15。

为了研究橡胶老化对板式橡胶支座剪切性能的影响,利用 ABAQUS 有限元分析软件建立板式

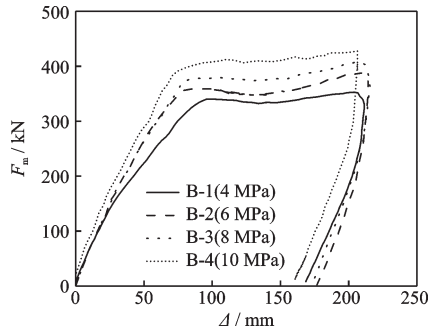


图4 摩擦力与位移关系

Fig.4 Relationship of frictional force with displacement

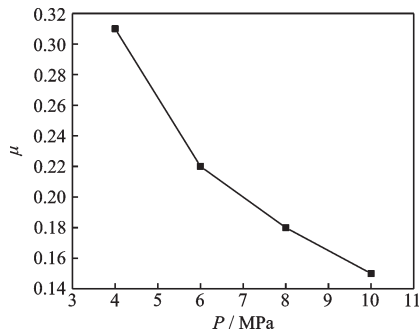


图5 摩擦系数与压应力关系

Fig.5 Relationship of friction coefficient with pressure

橡胶支座分析模型。根据 Mooney-Rivlin 模型即式 (11) 和式 (12) 计算获得不同橡胶材料老化时间对应的橡胶材料本构常数, 并采用 C3D8RH 混合单元模拟橡胶材料。钢板采用双线性模型, 弹性模量为  $2.0 \times 10^5$  MPa, 泊松比为 0.3, 利用 C3D8R 单元模拟, 支座整体模型如图 6 所示。

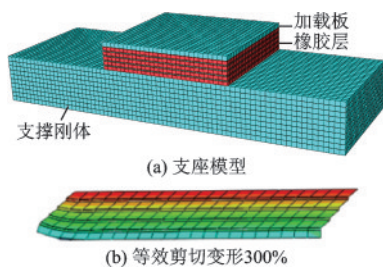


图6 支座有限元模型及变形示意

Fig.6 Finite element model and deformation of bearing

将有限元模型计算获得的支座摩擦滑移滞回曲线与试验结果进行了对比, 如图 7 所示(以竖向压强 6 MPa 下试件 B-1 为例)。可以看出, 模拟与试验结果吻合较好。此外, 对比分析了支座摩擦滑移后, 等效剪切应变在 200%、250% 和 300% 时的等效黏滞阻尼比, 见表 2。可以看出, 两者结果较为接近, 最大相差不超过 10%。以上结果表明有限元模型能够较好的反映支座在摩擦滑移各阶段的水平剪切变形和滞回耗能特性。

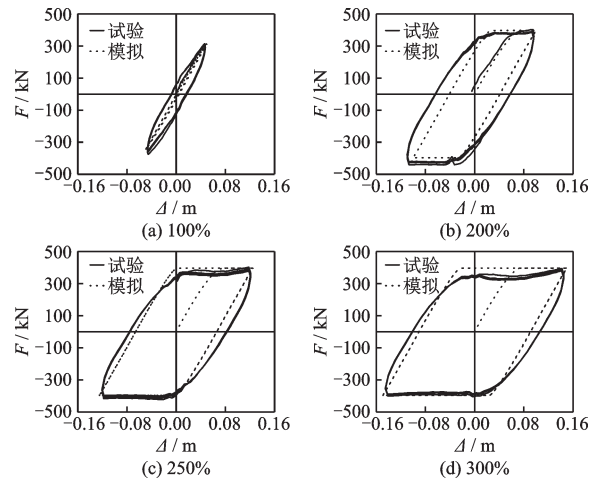


图7 支座水平往复荷载下力-位移关系曲线对比

Fig.7 Comparison of bearing force-displacement relationship curves under horizontal load

### 3 橡胶老化对板式橡胶支座剪切性能的影响

为验证考虑橡胶老化的支座模型的准确性, 结合考虑橡胶老化的支座剪切性能试验数据与有限元分析结果进行对比, 板式橡胶支座规格参数见文献[25]。图 8 为考虑橡胶老化的板式橡胶支座摩擦滑移滞回曲线试验与模拟的对比。

在实际加载试验过程中, 板式橡胶支座的钢板层与橡胶层会出现相对滑移。有限元分析过程中,

表 2 支座等效粘滞阻尼比对比

Table 2 Comparison of equivalent viscous damping ratio in test and simulation

单位: %

等效剪切 变形	B1			B2			B3			B4		
	试验	模拟	差值	试验	模拟	差值	试验	模拟	差值	试验	模拟	差值
200%	25.2	23.88	1.32	33.5	33.89	0.39	35.1	35.92	0.82	36.5	37.82	1.32
250%	34.9	31.85	3.05	37.8	35.36	2.44	39.2	40.23	1.03	39.5	40.67	1.17
300%	40.2	37.15	3.05	41.3	37.36	3.94	42.5	41.44	1.06	43.3	43.57	0.27

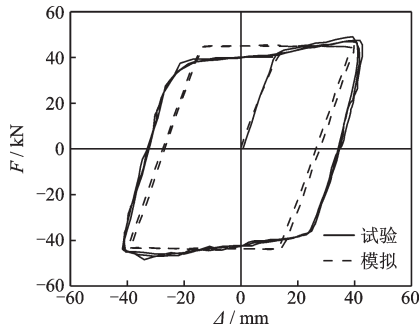


图8 考虑橡胶老化的支座试验与模拟力-位移曲线对比  
Fig.8 Comparison of force-displacement curves between bearing test and stimulation considering rubber aging

设定橡胶层与钢板层之间完全绑定,加载过程中未发生相对滑移。因此,试验与模拟存在较小的允许误差,误差值未超过8%。说明建立的考虑橡胶老化的板式橡胶支座模型与试验结果吻合程度较好,能够较为准确的反映橡胶老化后板式橡胶支座的剪切性能。

板式橡胶支座的摩擦滑移和橡胶老化会对海蚀环境下桥梁的抗震性能产生较大影响。因此,在获得可靠的板式橡胶支座计算模型的基础上,分析了橡胶材料老化对不同形状系数支座的摩擦滑移起始位移及耗能的影响,支座参数见表3。

表3 支座模型参数  
Table 3 Parameters of bearing model

序号	橡胶层总厚度/mm	橡胶层数	形状系数
P-1	40	5	16.38
P-2	50	5	13.10
P-3	60	5	10.91
P-4	75	5	8.73

### 3.1 橡胶老化对板式橡胶支座摩擦滑移起始位移的影响

桥梁橡胶支座的摩擦滑移起始位移是支座在水平地震作用下由可控转变为不可控运动状态的重要参考,在该点支座将由静摩擦转变为滑动摩擦,对于桥梁上部结构的位移控制具有较大影响。因此,在桥梁服役期内,支座剪切变形达到300%时,分析了橡胶老化时间对不同形状系数的板式橡胶支座摩擦滑移起始位移的影响。由图9可以看出,支座的摩擦滑移起始位移随着老化时间的增长而不断变大,且支座的形状系数越大,支座摩擦滑移起始位移也越大。这主要是由于服役期内,随着

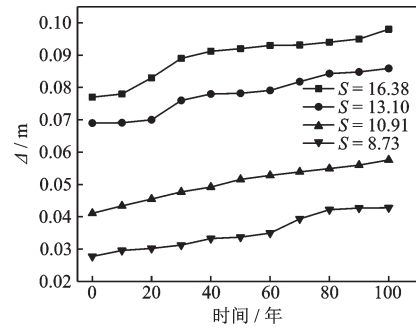


图9 老化对支座摩擦滑移起始位移的影响  
Fig.9 Effect of aging on the frictional slip distance of the bearings

注:图中S为板式橡胶支座的形状系数,下同

老化时间的增加,支座的抗剪刚度不断增大,且形状系数越大,支座橡胶层厚度越小,抵御水平变形的能力也越强。

因此,在海蚀与老化作用更明显的地区,采用板式橡胶支座的桥梁更应注意控制地震作用时桥梁上部结构的位移,防止落梁。同时,由于支座的形状系数越小则摩擦滑移起始位移相对越小,即橡胶层越厚,支座进入滑移状态时对应的上部结构的位移越小。故当桥梁所采用的板式橡胶支座较厚时,应注意地震作用下由于支座滑移导致的桥梁震害。

### 3.2 橡胶老化对板式橡胶支座摩擦滑移性能的影响

对不同形状系数支座初始状态、老化50年和老化100年时的力与位移滞回曲线进行了对比分析,在橡胶各老化阶段,支座形状系数越大,即橡胶层越薄,支座在水平荷载作用下的力与位移滞回曲线越饱满,如图10所示。这主要是由于支座橡胶层越薄,抵御水平变形的能力越大,支座越早的进入滑移阶段。因此,对于处于海蚀环境下的桥梁,当采用的板式橡胶支座形状系数较小时,需要考虑支座摩擦滑移对桥梁抗震性能的影响,避免由于支座滑移导致落梁震害。

由橡胶材料老化时间与支座摩擦滑移耗能E的关系曲线可以看出(如图11所示),随着老化时间的增长,支座通过摩擦滑移消耗的能量越多。对于形状系数为16.38的支座,橡胶材料老化100年比橡胶初始状态下通过摩擦滑移消耗的能量多33.21%。而在橡胶材料老化时间都为100年时,形状系数为16.38的支座通过摩擦滑移消耗的能量比形状系数为8.73的支座多41.87%。

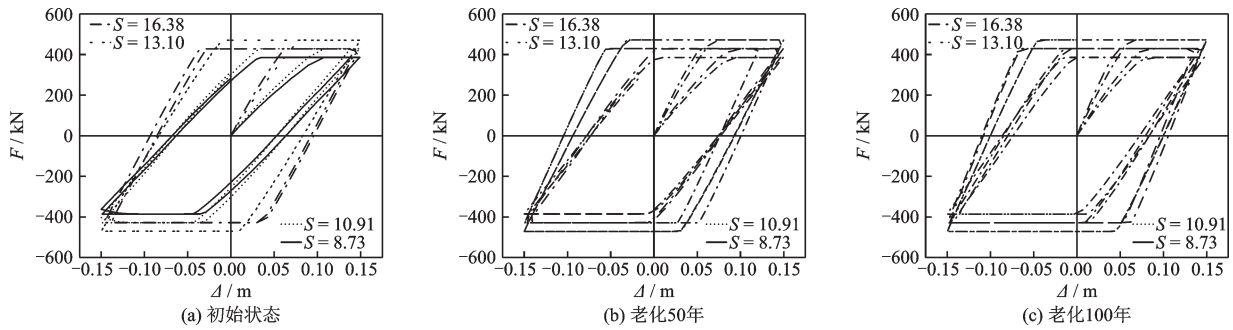


图10 老化时间对板式橡胶支座滞回性能的影响

Fig.10 Effect of aging time on the hysteresis performance of the plate rubber bearing

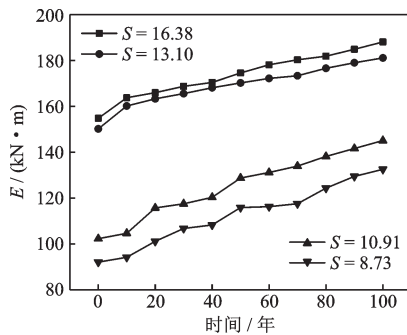


图11 老化对不同形状系数的支座耗能的影响

Fig.11 Effect of aging on energy dissipation of the bearing

通过图12橡胶材料老化时间与支座等效粘滞阻尼比关系曲线可以得出,随着老化时间的增加,支座的等效黏滞阻尼比在不断增大。对于形状系数 $S$ 为16.38和8.73的支座,橡胶老化时间100年是支座初始状态下等效粘滞阻尼比的1.17倍和1.40倍。同时,形状系数对支座的等效黏滞阻尼比也有较大的影响。支座的形状系数越大,等效黏滞阻尼比也越大。在橡胶老化时间达到100年时,形状系数为16.38支座的等效黏滞阻尼比是形状系数8.73的支座的1.42倍。

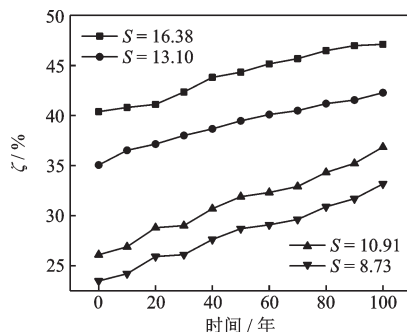


图12 老化对不同形状系数的支座等效黏滞阻尼比的影响

Fig.12 Effect of aging on the equivalent viscous damping ratio of the bearing

## 4 结论

桥梁震害表明摩擦滑移与橡胶老化对桥梁板式橡胶支座的地震剪切性能产生较大的影响。通过对海蚀环境下考虑摩擦滑移的桥梁板式橡胶支座老化剪切性能规律进行研究,得到以下结论:

(1)考虑支座摩擦滑移后,支座的摩擦滑移起始位移随着老化时间的增长而不断变大,且支座的形状系数越大,支座摩擦滑移起始位移也越大。

(2)随着老化时间的增加,支座通过摩擦滑移消耗的能量也不断增大。形状系数为16.38的支座,橡胶材料老化100年后比橡胶初始状态下通过摩擦滑移消耗的能量多33.21%。当橡胶材料老化时间都为100年时,形状系数为16.38的支座通过摩擦滑移消耗能量比形状系数为8.73的支座多41.87%。

(3)随着老化时间的增加,支座的等效黏滞阻尼比在不断增大。对于形状系数为16.38和8.73的支座,橡胶老化时间100年后的等效黏滞阻尼比是支座初始状态下的1.17倍和1.40倍,且支座的形状系数越大,等效黏滞阻尼比也越大。

## 参考文献:

- [1] 蓝兰. 我国跨海大桥建设情况分析[J]. 交通世界, 2012, 22(10):24-30.  
Lan L. Analysis on construction of cross-sea bridge in China[J]. Transportation World, 2012, 22(10):24-30. (in Chinese)
- [2] Li J Z, Peng T B, Xu Y. Damage investigation of girder bridges under Wenchuan Earthquake and corresponding seismic design recommendations[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(4): 337-344.

- [3] 王克海,吴刚,张盼盼. 板式橡胶支座摩擦滑移性能试验研究[J]. 振动与冲击,2020,39(19):1-6.  
Wang K H, Wu G, Zhang P P. Experimental study on frictional slip performance of plate rubber bearing [J]. Vibration and Shock, 2020, 39(19):1-6. (in Chinese)
- [4] 庄卫林,陈乐生. 汶川地震公路震害分析-桥梁与隧道[M]. 北京:人民交通出版社,2013.  
Zhuang W L, Chen L S. Seismic damage analysis of highway in Wenchuan earthquake - bridges and tunnels [M]. Beijing: People's Traffic Publishing House, 2013. (in Chinese)
- [5] McDonald J, Heymsfield E, Avent R R. Slippage of neoprene bridge bearings [J]. Journal of Bridge Engineering, 2000, 5(3): 216-223.
- [6] Konstantindis D, Kelly J M, Makris N. Experimental investigations on the seismic response of bridge bearings [R]. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, 2008.
- [7] 汤虎,李建中. 板式橡胶支座桥梁地震位移控制方法[J]. 中国公路学报,2013,26(3):110-116.  
Tang H, Li J Z. Displacement control method for continuous bridges on laminated rubber bearings under earthquake excitation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 110-116. (in Chinese)
- [8] 王凯睿,徐秀丽,李雪红,等. 考虑板式支座滑动效应的桥梁振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(12): 68-74.  
Wang K R, Xu X L, Li X H, et al. A study of the concrete continuous girder bridge shaking table test considering the sliding of laminated rubber bearings [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36 (12); 68-74. (in Chinese)
- [9] Itoh Y, Yazawa A, Kitagawa T, et al. Study on environmental durability of rubber bearing for bridges [C]// IABSE Symposium Report International Association for Bridge and Structural Engineering. New York: Curren Associates Inc, 2002.
- [10] Ab-Malek K, Stevenson A. The effect of 42 year immersion in Sea-water on Natural Rubber [J]. Journal of Materials Science, 1986, 21(1):147-154.
- [11] Itoh Y, Gu H S, Satoh K, et al. Experimental investigation on ageing behaviors of rubbers used for bridge bearings [J]. Doboku Gakkai Ronbunshun, 2006, 62(1):17-31.
- [12] Kato M, Watanabe Y, Yoneda G. Investigation of ageing effects for laminated rubber bearings of pelham Bridge [C]//Proceedings of 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, 1996.
- [13] Takenaka Y, Kondo A, Takaoka E, et al. Experimental study on heat-mechanics interaction behavior of laminated rubber bearings [J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 2009, 646(74): 2245-2253.
- [14] Gu H S, Itoh Y. Ageing behaviors of natural rubber and high damping rubber materials used in bridge Rubber bearings [J]. Advances in Structural Engineering, 2010, 6(13): 1105-1113.
- [15] Chou H, Wei H, Huang J S. Fatigue life prediction for circular rubber bearings subjected to cyclic compression [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 123(4): 2194-2203.
- [16] Mooney R. A theory of large elastic deformation [J]. Journal of Applied Physics, 1940, 11(4):582-592.
- [17] Marckmann G, Verron E et al. A theory of network alteration for the Mullins effect [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2002, 50(4):2011-2028.
- [18] Boyce M C, Arruda E M. Constitutive models of rubber elasticity: A review [J]. Rubber Chemistry and Technology, 2000, 73(3):504-521.
- [19] Treloar L R G. The elasticity of a network of long-chain molecules [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1943, 16(4):746-751.
- [20] Rivlin R S. Large elastic deformation of isotropic materials: I. Fundamental concepts, II. Some uniqueness theories for pure homogeneous deformations [J]. Philos Trans Roy Soc Lond Ser A, 1948, 240(4):459-508.
- [21] 马玉宏,李艳敏,赵桂峰,等. 基于热老化作用的橡胶隔震支座位学性能时变规律研究[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(5): 38-44.  
Ma Y H, Li Y M, Zhao G F, et al. Study on the time-varying law of mechanical properties of rubber seismic isolation bearings based on the effect of thermal aging [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017, 37(5):38-44. (in Chinese)
- [22] 李艳敏,马玉宏,罗佳润,等. 考虑老化时间影响的隔震支座橡胶本构 Mooney-Rivlin 模型常数研究[J]. 振动与冲击,2016,35(16):164-169.  
Li Y M, Ma Y H, Luo J R, et al. The effect of aging on the material constant of the rubber isolator's constitutive model Mooney-Rivlin [J]. Vibration and Shock, 2016, 35(16): 164-169. (in Chinese)
- [23] 公路桥梁板式橡胶支座:JT/T 4—2019[S]. 北京:人民交通出版社,2019.
- [24] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S]. 北京:人民交通出版社,2018.
- [25] 黄海新,李炫钢,李帆,等. 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[J]. 土木与环境工程学报, 2021, 43(3):51-58.  
Huang H X, Li X G, Li F, et al. Pseudo static test of seismic performance of rubber bearings plate under aging and eccentric compression [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(3): 51-58. (in Chinese)

(本文责编:苏泽云)