

引用格式:薛刚,贺存哲.基于摩擦滑移的板式橡胶支座耗能试验[J].科学技术与工程,2019,19(22):317-321

Xue Gang, He Cunzhe. Energy consumption test of rubber bearing based on friction slip[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19 (22): 317-321

基于摩擦滑移的板式橡胶支座耗能试验

薛刚 贺存哲*

(内蒙古科技大学土木工程学院,包头 014010)

摘要 地震作用下支座剪切滑移可以耗散部分能量,减轻桥梁下部结构损伤。为研究中小跨径梁桥板式橡胶支座剪切滑移耗能性能,采用3组不同轴向压应力单面滑动支座与1组无滑移支座试验。分析了不同轴向压应力下支座剪切滑移现象、滞回曲线、等效刚度、等效阻尼比。结果表明:随着轴向压应力降低,支座的滑动位移显著增大,脱空明显,滞回曲线面积增大,耗能能力显著增强;但限制了支座自身等效剪切变形与等效刚度的发挥。中小跨径桥梁可利用支座摩擦滑移耗散地震中的能量,该研究成果为进一步评价服役混凝土梁桥的安全性和可靠性提供了量化力学指标。

关键词 板式橡胶支座 耗能 摩擦滑移 剪切变形 地震

中图法分类号 U445; **文献标志码** B

板式橡胶支座构造简单、安装方便,成为中国中小跨径公路梁桥广泛使用支座形式^[1,2]。近二三十年地震震害表明,支座在地震作用下易出现移位、滑落、脱空等现象,支座损伤一定程度上减轻了下部结构的损伤^[3,4]。针对普通板式橡胶支座的构造特点和性能目标需求,国内外研究者主要考虑了界面连接方式、截面尺寸、竖向刚度等参数的影响^[5-9],对静力荷载作用下支座的摩擦系数、变形性能进行研究,给出了竖向刚度、摩擦系数随水平剪应变的变化规律,建立了屈服后刚度与剪切应变和竖向压应力之间的关系,并指出其力学性能主要由支座的几何参数和组成材料决定。但是在桥梁抗震设计中,板式橡胶支座大都没有考虑支座与墩顶、梁体接触面之间的滑动耗能效应,研究集中在考虑无摩擦滑移即板式橡胶支座自身剪切耗能性能。

因此,利用板式橡胶支座的摩擦滑移进行中小跨径桥梁的抗震设计,通过改变不同轴向压应力实现降低其水平摩擦力,进行板式橡胶支座单面剪切滑移试验。分析了不同轴向应力下板式支座剪切滑移现象、滞回曲线、等效刚度、等效阻尼比。得出了地震作用下利用板式橡胶支座剪切滑移耗能的优越性,以期对公路桥梁板式橡胶支座体系的完善及在

地震作用下的安全性评估建设均提供一定借鉴和指导意义。

1 试验设计

中国中小跨径梁桥板式橡胶支座设计荷载通常为10 MPa、8 MPa、6 MPa,试验设计以上3组不同轴向压应力支座,支座上表面与加载设备固定,下表面在加载的过程中可以发生相对滑动,并与1组无滑移支座进行对照。试验中支座表面采用放置砂纸限制支座与加载表面相对滑动,在B1~B3支座上表面放置砂纸,在B4支座上下表面均放置砂纸。支座具体参数如表1所示,加载装置示意图1所示。

表1 支座设计参数(GYZ)
Table 1 Parameter design of bearing (GYZ)

型号	d/mm	S	t/mm	t _e /mm	P/MPa	接触方式
B1	300	9.1	63	45	10	单面砂纸
B2	300	9.1	63	45	8	单面砂纸
B3	300	9.1	63	45	6	单面砂纸
B4	300	9.1	63	45	10	双面砂纸

注:GYZ表示圆形板式橡胶支座。d为支座直径;S为支座形状系数;t为支座总厚度;t_e为支座橡胶层总厚度;P为轴向压应力。

试验采用力加载,首先施加轴向压应力,当达到设定值后保持恒定;然后水平方向进行4次循环加载,最大水平应力为1 MPa,使支座产生水平剪切变形与滑移。支座水平加载示意如图2所示。

2 试验现象描述

B1支座水平初次加载应力至1.0 MPa时,支座脱空深度达2 cm、剪切位移为5.8 cm,相当于120%

2019年1月4日收到 国家自然科学基金(51868063)资助
第一作者简介:薛刚(1968—),男,汉族,内蒙古包头人,博士,教授。E-mail:xuegang-2008@126.com。

*通信作者简介:贺存哲(1992—),男,汉族,山东济宁人,硕士研究生。E-mail:hecunzhe@163.com。

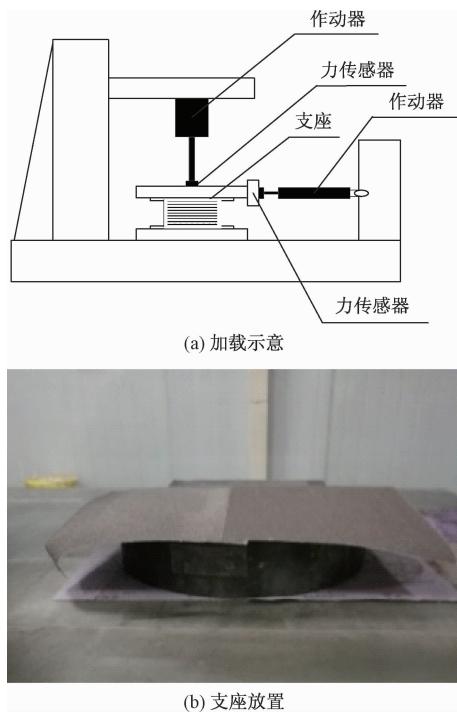


图 1 试验加载
Fig. 1 Test loading

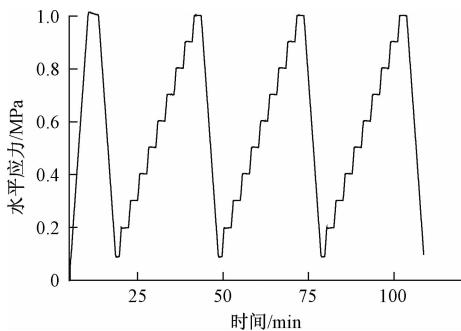


图 2 加载制度
Fig. 2 Loading rule

支座剪切变形;后逐级循环加载 3 次,现象与首次加载结果基本一致。卸载至 0.1 MPa 支座仅存在少量剪切变形,无滑移与脱空现象。B4 支座加载过程现象与 B1 支座类似。B2 支座初次加载至 0.5 MPa 时发生明显脱空与少量滑移;水平应力至 1 MPa 时,脱空深度达 3.5 cm,滑动位移达到 3 cm;逐级加载 3 次,支座残余滑动位移为 1.5 cm,无明显剪切变形与脱空。B3 支座初次加载水平应力至 0.5 MPa 时,支座发生明显脱空与滑移,脱空深度为 3 cm、滑动位移为 3 cm;水平应力达到 1 MPa 时,脱空深度基本保持不变,滑动位移显著增大至 6 cm。第一次正式加载至水平应力 1 MPa 时,支座滑动位移 8.5 cm,脱空深度 5 cm。再次加载至 0.8 MPa,滑动位移为 14 cm,由于滑动位移过大导致偏心距增大、存在明显偏心受压,位移超过位移计的量程而停止试验。

即对于 B1 与 B4 支座,其剪切变形随着水平应力的增加而增大,卸载后无脱空与残余位移。对于 B2 与 B3 支座,其剪切变形随着水平应力增加经过 3 个阶段:仅发生剪切变形;剪切变形伴随少量滑移;位移增加主要由支座滑动贡献。

3 板式橡胶支座耗能试验分析

3.1 滞回曲线分析

不同压应力下支座滞回曲线如图 3 所示,它反映支座在反复受力过程中的变形特征及能量消耗,其中剪应变为支座加载位移与橡胶层厚度的比值,等效剪应变为支座自身剪切位移与橡胶层厚度的比值。B1 与 B4 支座滞回曲线基本一致,支座剪切应变随加载次数的增加而增大,最大剪应变为 120%,滞回面积呈细长梭形。结合试验现象描述,两种支座水平滑动位移和脱空深度较小,其剪应变主要由支座本身剪切变形所贡献。对于轴向应力为 8 MPa 与 6 MPa 的 B2、B3 支座,支座剪应变随轴向压应力的降低而显著增大,最大剪应变分别为 140% 与 400%,明显大于 B1 支座。结合试验现象描述,支座剪应变主要由支座滑动位移所贡献,摩擦滑移可明显增加支座的耗能能力,滞回环面积较大。

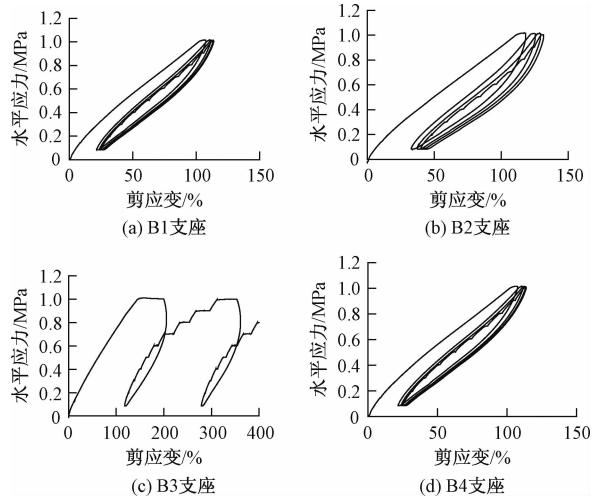


图 3 支座滞回曲线
Fig. 3 Hysteresis curve of bearing

3.2 剪切变形对比分析

由于 B1 与 B4 支座滞回曲线与试验现象基本相同,仅讨论 B1 ~ B3 支座第二次加载剪切变形,来阐述轴向压应力对剪切变形的影响,如图 4 所示。B1 与 B2 支座的剪应变随着水平应力呈线性增加,B3 支座的剪应变在 0.5 MPa 内呈线性增加,后增长幅度明显增大,是由于偏心距增大,产生二次弯矩,进一步增大了其滑动性能,耗能能力提高。B1 与 B2 支座在 0.1 MPa 下初始剪应变比较低,而 B3 支

座初始剪应变达到 119%, 说明在第一次加载过程中产生了不可恢复的残余变形。

由图 5 可知, B1 ~ B3 支座应力小于 0.5 MPa 时, 支座等效剪切应变曲线重合, 支座以剪切变形为主, 并未产生滑动; 随着水平应力的增加, B1 支座等效剪切应变增加较快, 其次是 B2 支座, 说明支座在滑动的过程中降低了其本身的剪切变形。当 B3 支座水平应力达到 0.8 MPa、B2 支座水平应力达到 0.9 MPa 时, 支座等效剪切应变不再增加, 应力应变曲线呈水平状, 最大等效剪应变为 84% 与 104%, 占支座最大剪应变的 23% 与 80%。

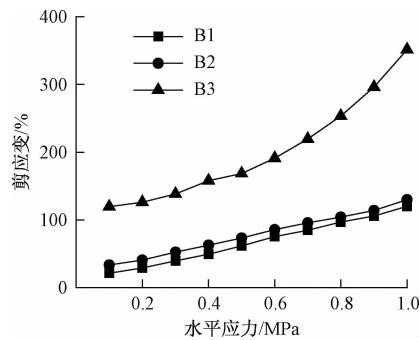


图 4 支座剪应变

Fig. 4 Shear strain of bearing

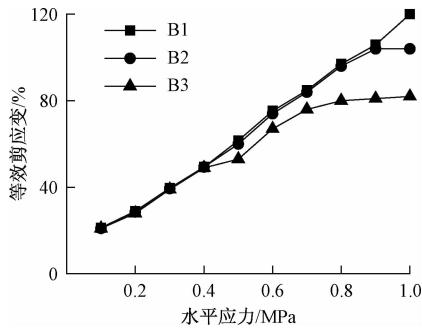


图 5 支座等效剪应变

Fig. 5 Equivalent shear strain of bearing

3.3 等效刚度对比分析

参考《公路桥梁板式橡胶支座》^[10], 橡胶支座等效剪切刚度 K 公式如式(1)所示, 板式橡胶支座弹性剪切模量 G 公式如式(2)所示, 其中剪应力与剪应变都是在支座无滑移状态下测定, 现取 B4 支座实测剪应力与等效剪应变计算值为实测剪切模量。

$$K = G \frac{A}{t_e} \quad (1)$$

$$G = \frac{\tau_{1.0} - \tau_{0.3}}{\gamma_{1.0} - \gamma_{0.3}} \quad (2)$$

式中: G 为橡胶支座的剪切模量, MPa; t_e 为支座橡胶层厚度, mm; A 为橡胶支座竖向承载有效面积,

m^2 ; $\tau_{1.0}$ 和 $\tau_{0.3}$ 分别为 1 MPa 和 0.3 MPa 级荷载下的剪切应力; $\gamma_{1.0}$ 和 $\gamma_{0.3}$ 分别为 1 MPa 与 0.3 MPa 下对应的等效剪切应变。

根据试验规范实测结果, 支座弹性剪切模量 G 为 0.7 MPa, 代入式(1)计算得 $K = 1099 \text{ kN/m}$ 。

由试验可得 B1 ~ B3 支座的等效刚度—等效应变曲线, 其中等效刚度为水平力与等效位移的比值, 如图 6 所示。在等效应变 70% 范围内, B1 ~ B3 支座的等效剪切刚度随着等效剪应变的增加而增大且数值大小基本一致; 当等效应变大于 70% 时, 支座的等效刚度的大小顺序为 B1 > B2 > B3。当 B2 支座等效剪应变大于 105%, B3 支座的等效剪应变大于 84% 时, 支座不存在实测等效刚度, 说明此时支座达到最大等效剪切变形。B1 ~ B3 支座最大水平剪切刚度分别为 1 082 kN/m、1 014 kN/m、990 kN/m, 与计算值相差 1.5%、7.7%、10%。可见, 在支座剪切变形、滑动等因素影响下, 无滑动支座水平等效刚度与计算值接近, 支座滑动后刚度较规范值明显降低, 支座设计时应考虑其随等效剪应变的刚度变化趋势。

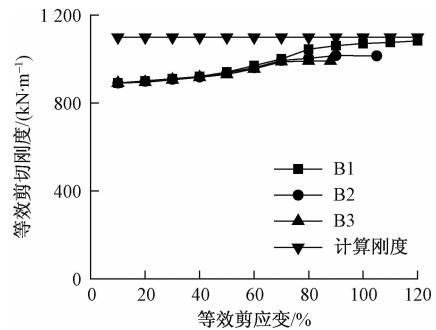


图 6 支座等效刚度对比

Fig. 6 Equivalent stiffness comparison of bearing

3.4 等效阻尼比对比分析

等效阻尼比 h_{eq} 是根据一个振动循环内等效阻尼耗能与实际阻尼耗能相等原理得到的, 包含了循环往复荷载作用下推拉方向的弹性耗能和非弹性耗能, 如式(3)所示。由试验结果可计算得到支座最大剪切变形不超过 200% 时等效阻尼比, 如表 2 所示。可以看出, 当支座产生滑移后, 支座的等效阻尼比随着剪切变形的增加而增大; 且支座滑移明显增大了其等效阻尼比。在一定程度上说明支座摩擦滑移耗散了地震的能量, 减轻了桥梁的整体损伤。

$$h_{eq} = \frac{2\Delta\omega}{\pi k_h (X_1 - X_2)^2} \quad (3)$$

式(3)中: $\Delta\omega$ 为滞回曲线包围的面积; k_h 为等效刚度; X_1 为支座最大位移; X_2 为支座最小位移。

表 2 支座等效阻尼比

Table 2 Equivalent damping ratio of bearing

剪应变/%	B1 支座	B2 支座	B3 支座	B4 支座
50	5.6	6.1	9.2	5.6
100	9.7	10.2	15.5	9.7
130	-	14.8	17.6	-
150	-	-	19.1	-
200	-	-	24.9	-

4 结论

(1) 无滑移板式橡胶支座滞回曲线狭长, 地震作用下可利用自身剪切变形耗散能量。滑动位移较大的板式橡胶支座, 摩擦滑移耗散能量较大, 减轻了桥梁下部结构的损伤, 但支座的摩擦滑移限制约束支座等效剪切变形力学性能的发挥。

(2) 随着支座轴向压应力的降低, 可显著增加支座的滑动位移, 卸载后支座残余剪切变形、滑移位移和脱空深度不宜恢复, 在实际工程中应与防落梁装置配套使用。且循环加载可显著增加支座的滑移位移。

(3) 提出用等效剪切刚度表征板式支座的水平剪切刚度, 在考虑支座与界面摩擦滑动效应的情况下, 等效剪切模量的取值为 0.7 MPa。随着水平应力的增加, 支座的等效剪切刚度不断增大, 但在支座剪切模量、尺寸、滑动等因素影响下, 支座剪切刚度实测值较设计剪切刚度计算值小, 最大相差 10%。

参 考 文 献

- 王瑞龙. 板式橡胶支座连续梁桥横桥向抗震性能研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2017(9): 188-190
Wang Rui long. Study on transverse seismic performance of laminated rubber bearing continuous beam bridge [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2017(9): 188-190
- 李 嫚. 公路桥梁板式橡胶支座减震原理与应用分析 [J]. 交通世界, 2017(增刊1): 97-98
Li Yuan. Principle and application analysis of slab rubber bearing for highway bridges [J]. Transpoworld, 2017(S1): 97-98

- 庄卫林, 陈乐生. 汶川地震公路震害分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2013
Zhuang Weilin, Chen Lesheng. Highway earthquake damage analysis in wenchuan earthquake [M]. Beijing: People's Transportation Press, 2013
- 李立峰, 吴文朋, 黄佳梅, 等. 板式橡胶支座地震易损性分析 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(11): 1-6
Li Lifeng, Wu Wenpeng, Huang Jiamei, et al. Research on the seismic vulnerability analysis of laminated rubber bearing [J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2011, 38(11): 1-6
- 刘泓, 张延年, 闫煦, 等. 冻融条件下矩形板式天然橡胶支座轴压性能 [J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016(9): 961-967
Liu Hong, Zhang Yannian, Yan Xu, et al. Compression performance of rectangle plate natural rubber bearings under the alternate freezing and thawing environment [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2016(9): 961-967
- Ohsaki M, Miyamura T, Kohiyama M, et al. Finite-element analysis of laminated rubber bearing of building frame under seismic excitation [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 44(11): 1881-1898
- 李悦, 李冲, 李茜. 地震作用下板式橡胶支座滑移对中小跨径梁桥抗震性能的影响 [J]. 土木工程学报, 2014(增刊1): 124-129
Li Yue, Li Chong, Li Qian. Effect of elastomeric bearings slide on seismic performance of small and medium span girder bridges in earthquake [J]. China Civil Engineering Journal, 2014(S1): 124-129
- Mazza F, Alesina F. Effects of site condition in near-fault area on the nonlinear response of fire-damaged base-isolated structures [J]. Engineering Structures, 2016, 111(3): 297-311
- 李瑞. 板式橡胶支座本构试验及抗震性能研究 [D]. 北京: 中国地震局工程力学研究所, 2016
Li Rui. Constitutive experiment and seismic performance researches of laminated rubber bearing [D]. Beijing: Institute of Engineering Mechanics, CEA, 2016
- 山东科学技术出版社. 公路桥梁板式橡胶支座规格系列 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2007
Shandong Science and Technology Publishing House. Specification Series of Plate Rubber Bearings for Highway Bridges [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Publishing House, 2007

Energy Consumption Test of Rubber Bearing Based on Friction Slip

XUE Gang, HE Cun-zhe*

(School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

[Abstract] The shear slip of bearing under earthquake can dissipate part of energy and reduce the damage of bridge substructure. In order to study the shear energy dissipation performance of slab rubber bearings of small and medium span bridges, three groups of unilateral sliding bearings with different axial stresses and one group of non-sliding bearings were compared. Shear slip phenomena, cyclic curves, equivalent stiffness and equivalent damping ratio of bearings under different axial stresses were analyzed. The results show that the sliding displacement, the void, and the hysteresis curve area of the bearing increase, and the energy consumption is significantly enhanced with the reduction of axial stress. However, the effective shear deformation and stiffness of the bearing itself are limited. Small and medium-span bridges can dissipate energy in earthquake by friction slip of rubber bearings. The results of this study provide quantitative mechanical indexes for further safety and reliability evaluation of serving concrete beam bridges.

[Key words] rubber bearing energy dissipation friction slip shear deformation earthquak