

梯形钢阻尼器盆式橡胶支座的吸能特性研究

胡雪枫, 杨晓翔

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 针对在单向力作用下梯形钢阻尼器的变形情况, 建立整体结构的水平力-位移表达公式, 通过 ABAQUS 软件进行仿真, 得到支座荷载-位移的滞回曲线, 分析不同影响因素对支座滞回曲线的影响规律。通过地震荷载响应分析, 得到地震荷载下的荷载-位移曲线, 同时分析了单向与双向加载下的吸能特性。结果表明: 新型支座具有良好耗能特性, 可以有效地减少地震波造成的破坏。

关键词: 梯形钢阻尼器; 盆式橡胶支座; 地震波; 吸能特性

中图分类号: TH12; U442.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2022)01-0015-04

Study on Energy Absorption Characteristics of Basin Rubber Bearing with Trapezoidal Steel Damper

HU Xuefeng, YANG Xiaoxiang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To address the deformation of trapezoidal steel damper under the action of one-way force, the horizontal force displacement expression formula of the whole structure is established, and the load displacement hysteretic curve of the bearing is obtained through simulation by ABAQUS software. Seismic load response is analyzed to gain the load displacement curve under seismic load, and the energy absorption characteristics under unidirectional and bidirectional loading are studied. The results show that the new bearing has good energy dissipation characteristics and can effectively reduce the damages caused by seismic waves.

Keywords: trapezoidal steel damper; pot rubber bearing; seismic wave; energy absorption characteristic

0 引言

盆式橡胶支座被广泛应用于各种弯梁桥中。GOMES H C^[1]分析出了地震和车辆荷载以及弯梁桥的荷载以及弯梁桥的位移响应。在地震时, 弯桥上部结构在地震作用下发生的位移量远远大于直线桥, 在其弯扭耦合作用下, 产生横向剪切破坏, 可能导致桥梁发生脱落。朱文骏^[2]讨论和分析了盆式支座在不同频率、不同幅值的位移简谐波以及单向地震输入条件下的力-位移关系。许汉铮等^[3]发现考虑摩擦滑移特性能够有效减小结构地震响应。针对地震波的影响, 庄鑫等^[4]分析比较了不同约束方式下结构的地震响应, 发现采用弹塑性钢挡块可以合理控制横向墩梁相对位移和墩柱的横向地震反应。

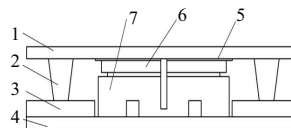
好的减震效果离不开各种新型吸能装置。李正官等^[5]提出了一种仿生吸能结构, 可以降低其在碰撞过程中的峰值载荷。郑小龙等^[6]设计了一种 E 型钢阻尼器, 发现其可有效减小简支梁桥的墩顶相对位移和墩底内力, 满足抗震要求。刘笑显等^[7]研究了 X 形弹塑性钢挡块对桥墩横向地震响应的影响, 发现与未设置弹塑性挡块模型相比, 支座位移减小 30%~40%, 还可减小桥墩剪力及弯矩。焦驰宇等^[8]通过 FPS 支座双向加载拟静力试验, 得到 FPS 支座的荷载-位移滞回曲线与摩擦耗能情况。杨

小虎^[9]发现摩擦摆支座在两水平方向存在耦合, 由于只考虑单向地震会低估支座位移。

针对目前单向荷载不能准确地反映地震带来的危害, 本文设计了一种梯形钢阻尼器, 并从单向和双向耦合两个方面进行分析, 得到支座单向的滞回曲线, 并以双向位移菱形加载为例, 分析耦合后支座位移与其耗能特性, 并模拟分析在地震波作用下, 支座在单向和双向下的耗能特性。

1 盆式橡胶支座的力学模型

如图 1 所示, 聚四氟乙烯板与顶板的接触面为滑移面, 在地震荷载或温度变化等因素作用下, 两侧的梯形钢阻尼器会随着顶板一起滑动。钢挡块视为刚体, 不发生变形。阻尼器与挡块接触后, 钢阻尼器下端的水平位移被约束, 使得钢阻尼器发生弯曲变形。



1—顶板; 2—钢阻尼器; 3—钢挡块; 4—底板; 5—聚四氟乙烯板; 6—钢座; 7—钢盆。

图 1 支座侧视图

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11972005)

第一作者简介: 胡雪枫(1996—), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要从事橡胶支座方面的研究。

1.1 工作原理(单向)

1) 初始阶段

在水平力作用下,支座顶板连带着阻尼器产生运动趋势。

2) 摩擦滑动阶段

随着水平力逐渐增大,接触面间的静摩擦力被克服,产生相对滑动。

3) 阻尼板弹性变形阶段

梯形钢阻尼器与挡块接触,发生弹性变形直到屈服。由于屈服位移很小,此阶段相对短暂,承受的水平力迅速增大。

4) 阻尼板塑性变形阶段

钢阻尼器屈服后,梯形钢阻尼器产生塑性变形。

1.2 顶板摩擦滑移

盆式支座通过聚四氟乙烯板与顶板之间的摩擦滑移满足结构的水平位移。由支座最大滑动摩擦力与弹性恢复力相等可得

$$K \cdot x_y = F_1 = \mu \cdot N \quad (1)$$

式中: K 为初始刚度; x_y 为支座屈服位移; F_1 为临界滑动摩擦力; μ 为滑动摩擦系数; N 为其承担的上部结构荷载。那么初始刚度 K 为

$$K = \frac{\mu \cdot N}{x_y} \quad (2)$$

根据《公路桥梁盆式支座》和《铁路桥梁盆式支座》设计规范^[10-11],滑动摩擦系数与支座使用的环境有关,常温型的 $\mu \leq 0.03$,取 $\mu = 0.03$ 。根据试验可知, x_y 为 2~5 mm^[12],取 $x_y = 4$ mm。

当支座开始水平滑动后,阻隔了地震在桥墩与主梁之间的直接传递,因此支座具有一定的隔震作用。从耗能角度来说,支座通过聚四氟乙烯板与不锈钢板间的滑动摩擦将部分地震能量转化为了热能,但由于摩擦系数较小,摩擦耗能作用相当有限。

1.3 钢阻尼器变形分析

钢阻尼器采用双线性弹塑性模型。阻尼器先发生弹性变形,屈服后发生塑性变形。对于这种悬臂受力的梯形钢板,基于变截面悬臂梁模型,根据梁理论可得到梯形阻尼器水平力与水平位移的关系^[13]:

$$F = \begin{cases} \frac{nE_0sb(x)t^3}{6h^3} & 0 \leq s < s_y \\ \frac{nQ_yb(x)t^2}{12h} \left[3(1-\alpha) + (\alpha-1) \frac{\varepsilon_y^2 h^4 + 2\alpha st}{s^2 t^2 + \varepsilon_y h^2} \right] & s_y \leq s < s_u \end{cases} \quad (3)$$

$b(x)$ 为截面宽度:

$$b(x) = a + \frac{b-a}{h}x \quad 0 \leq x \leq h \quad (4)$$

式中: n 为钢板个数; E_0 为钢材初始弹性模量; s 为悬臂端水平位移; b 为阻尼器宽度; t 为阻尼器厚度; h 为阻尼器高度; σ_y 为屈服应力; α 为钢材屈服后模量与初始弹性模量的比值; ε_y 为屈服应变; a 为梯形上底宽度; x 为上底到截面的距离。

图2给出了支座单向力-位移曲线。在单向力作用下,活动盆式支座的滑动位移因为梯形钢阻尼器的加入会受到一定约束,新支座的水平承载力得到提升。

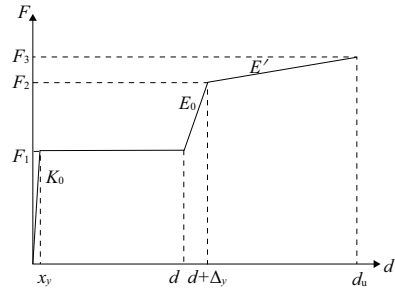


图2 钢阻尼器支座的单向力-位移曲线

2 支座有限元模型

工程上多采用 Mooney-Rivlin 本构模型来模拟橡胶的本构特性,其使用范围为拉伸应变 100% 以内、压缩应变 30% 以内的中小变形模拟。本文选用两参数的 Mooney-Rivlin 模型来模拟橡胶块^[14]。橡胶块的材料参数见表1。

表1 橡胶块的材料参数

密度/(kg/m ³)	泊松比	C ₀₁ /MPa	C ₁₀ /MPa
1.3×10 ³	0.499 8	0.482 5	0.120 6

其余部件选用 Q345 钢。Q345 钢的材料参数^[15]见表2。阻尼器下底宽度 $b = 40$ mm,上底宽度 $a = 20$ mm,高度 $h = 240$ mm,厚度 $t = 10$ mm。

表2 Q345 钢的材料参数

密度/(kg/m ³)	弹性模量 E ₀ /MPa	泊松比	α	屈服强度 σ_y /MPa	极限应变 ε_u
7.85×10 ³	2.06×10 ⁵	0.3	0.04	345	0.05

图3给出了支座的有限元模型。均采用杂交 C3D8H 单元进行完全积分,匀速位移加载时选择静态分析,施加地震载荷时选择隐式动力学分析。施加竖向载荷 600 kN。阻尼板与顶板焊接绑定,设置橡胶块表面接触摩擦系数为 0.7;钢表面接触摩擦系数为 0.03。

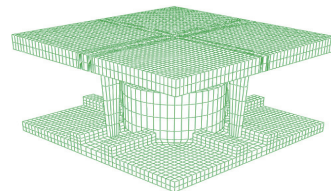


图3 支座网格模型

3 单向及双向静力加载分析

3.1 单向加载

模拟静力加载,使上下板发生相对滑动。选择位移控

制加载,分析不同荷载作用下支座的耗能特性。

图4给出了位移加载的变幅值曲线,图5给出了支座在变幅值位移下的滞回曲线。4组往复循环对应着滞回曲线中4组大小不同的封闭曲线。开始时,位移较小,阻尼器没有接触到挡块,支座在摩擦滑移作用下往复运动,滞回曲线为图5中最中心的封闭平行四边形 *nabcd*。随着位移增大,阻尼器接触到挡块后,首先发生弹性变形;当应力值超过材料屈服强度后,阻尼器屈服并开始塑性变形 (*ef*段),对应第二个循环 *nefghrd*。由于包辛格效应,支座卸载时的弹性变形量要小于正向加载时的弹性变形量,如 *gh*段,且自身存在残余变形。在第三个循环 *nfopikm*中,随着幅值增大,阻尼器塑性变形量明显加大,如 *fo*段。阻尼器存在的残余变形导致反向加载时变形量进一步增加,如 *kj*段。对于每一次往复循环加载,相较于上一轮循环,正向加载的位移增大,阻尼器变形量加大,残余变形量也增大,导致反向加载时变形提前,如 *r-i-q*,而正向与反向加载的幅值大小相等。因此反向变形量相较于正向变形量有所增大。

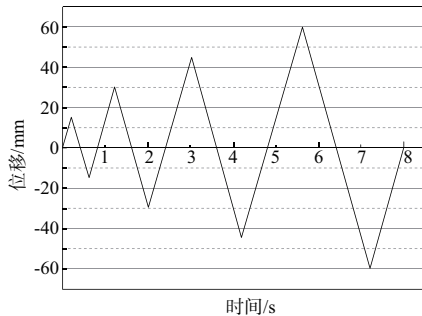


图4 单向变幅加载过程

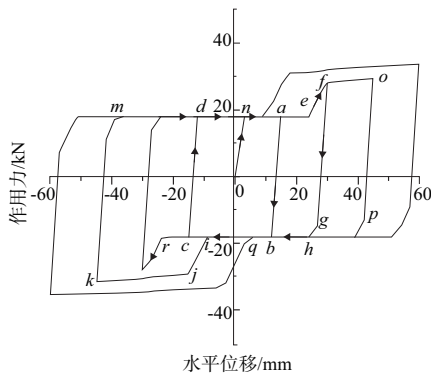


图5 单向加载下支座滞回曲线

总体来看,滞回曲线表现出对称性。随着位移的增大,支座的滞回曲线面积不断增大,曲线愈加饱满。梯形钢阻尼器橡胶支座表现出良好的吸能特性。

在竖向载荷不变的情况下,支座的吸能特性与钢阻尼器的参数紧密相关。图6、图7给出了阻尼器不同参数下支座的滞回曲线。从图中可以看出,相同位移下,增加阻尼板的厚度和数量,使得阻尼器刚度增大,屈服强度与屈服力随之增加,导致滞回面积增大。因此,在实际使用中,可加厚阻尼器或增加钢板个数以提高支座的吸能特性。

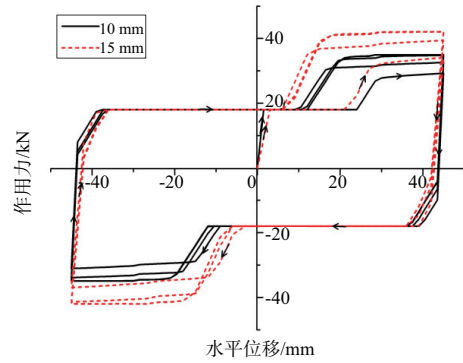


图6 不同厚度阻尼器对应的支座滞回曲线

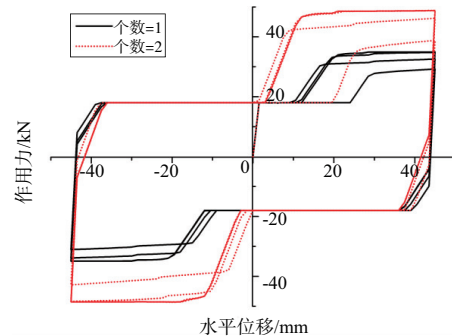


图7 不同个数阻尼器对应的支座滞回曲线

3.2 双向耦合加载

在实际使用中,双向盆式支座可以在其平面内任意方向均发生滑移。因此,将平动简化为 *x, y* 两个方向上的运动并进行耦合分析。设置支座整体运动曲线(图8)为菱形,比较单向加载与双向加载下支座的吸能特性。

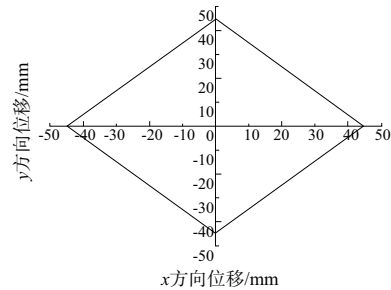


图8 菱形加载轨迹

支座在双向与单向加载下的吸能特性对比如图9所示。

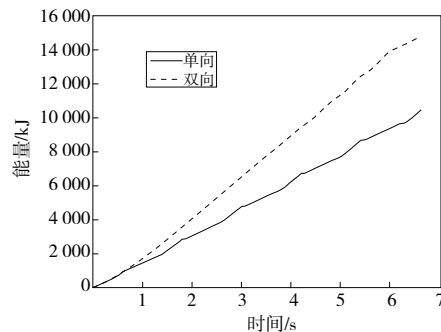


图9 单向与双向加载下的吸能特性对比

从图9中可以看出,相对于单向加载,支座的运动距离变为原来的约 $\sqrt{2}$ 倍,支座的碰撞次数加倍,导致摩擦滑移吸能与塑性变形吸能均增加,且随着加载不断循环,增量愈来愈大。由此可见,支座在双向运动时,运动距离更大,碰撞更加频繁,支座吸收更多的能量,吸能效果更加显著。

4 地震荷载作用下支座吸能分析

运用地震波合成软件 SIMQKE_GR,合成转化得到如图10所示的地震波加速度-位移时程曲线,探究支座在地震作用下的吸能特性。

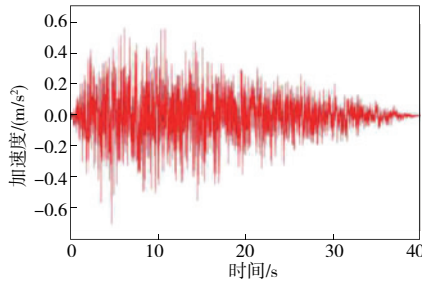


图10 地震波加速度时程曲线

运用 ABAQUS 软件模拟上述地震波作用下支座的吸能效果,得到支座水平力-位移滞回曲线,如图11所示。

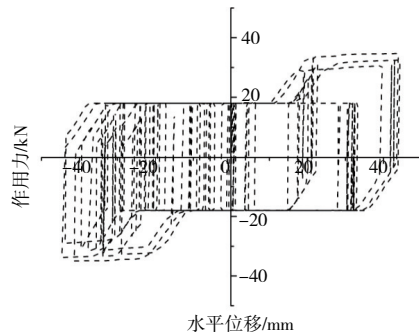


图11 支座水平力-位移滞回曲线

可以看出,在地震波作用下,支座发生高频振动,持续进行小幅往复位移同时伴有少量大幅往复位移。对于小幅往复位移,地震的能量通过摩擦滑移得到耗散,而对于瞬时大幅位移,挡块起到了限位的作用,同时阻尼器很好地吸收了地震波的能量。

以 x 主方向, y 次方向作为地震波输入方向。根据《建筑抗震设计规范》^[16]中规定: x 、 y 两方向的峰值加速度比值为1:0.85。图12给出了单向与双向地震荷载下支座的吸能情况。结果表明:梯形阻尼器对地震破坏起到良好的保护作用,限制滑移距离的同时吸收峰值冲击能量;相比于单向地震荷载,在双向地震荷载下,支座吸能明显增加。

5 结语

1)给出了梯形钢阻尼器盆式橡胶支座的力学模型,基于 ABAQUS 软件,分析了支座在不同加载条件下的滞回特性。结果表明,支座表现出良好的吸能特性。加厚阻尼器,增加阻尼器个数,吸能特性随之增强。

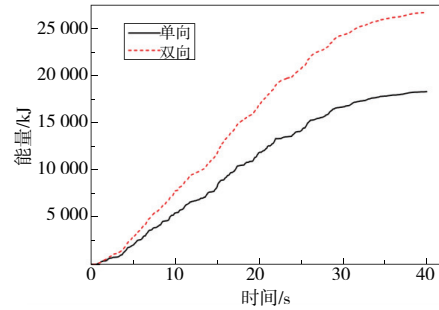


图12 单向与双向地震作用下的吸能特性对比

2)分析了在平面内双向运动时,支座的吸能特性,结果显示,双向作用下支座吸能明显增加。

3)梯形阻尼器对地震破坏起到良好的保护作用,限制滑移距离的同时吸收峰值冲击能量,在双向地震波作用下效果更加显著。

参考文献:

- [1] GOMEZ H C, FANNING P J, FENG M Q, et al. Testing and long-term monitoring of a curved concrete box girder bridge[J]. Engineering Structures, 2011, 33(10): 2861-2869.
- [2] 朱文骏. 桥梁盆式支座地震作用下的力学性能研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2015.
- [3] 许汉铮, 李晓涛, 刘青, 等. 连续弯梁桥盆式支座摩擦滑移特性分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(9): 3756-3762.
- [4] 庄鑫, 李建中, 王瑞龙. 横向抗震挡块对桥梁抗震性能的影响分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2014, 27(1): 14-18.
- [5] 李正官, 郭策. 仿生吸能结构的设计及耐撞性研究[J]. 机械制造与自动化, 2012, 41(6): 115-117, 120.
- [6] 郑晓龙, 金怡新, 吕娜. E型钢阻尼支座的设计与减震性能分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(2): 70-75.
- [7] 刘笑显, 李建中, 陈旭. X形弹塑性钢挡块对简支梁桥横向地震反应影响[J]. 振动与冲击, 2015, 34(2): 143-149.
- [8] 焦驰宇, 马银强, 刘陆宇, 等. FPS 支座双向加载拟静力试验与数值模拟研究[J]. 工程力学, 2019, 36(z1): 86-91.
- [9] 杨小虎. 单向及双向地震作用下摩擦摆支座隔震高铁桥梁抗震性能分析[D]. 广州:广州大学, 2016.
- [10] 交通运输部. 公路桥梁盆式支座: JT/T 391—2009[S]. 北京:人民交通出版社, 2009.
- [11] 中华人民共和国铁道部. TB/T 2331—2013 铁路桥梁盆式支座[S]. 北京:中国铁道出版社, 2013.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁抗震设计细则: JTG/T B02-01—2008[S]. 北京:人民交通出版社, 2008.
- [13] 樊冰冰. V形钢阻尼耗能盆式支座减隔震性能研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [14] 刘青. 连续弯梁桥盆式支座摩擦滑移特性分析[D]. 西安:长安大学, 2019.
- [15] 石永久, 王萌, 王元清. 循环荷载作用下结构钢材本构关系试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3): 293-300.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.

收稿日期:2020-12-14