

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20200914001

装配式摩擦-软钢耗能支座设计与性能试验*

方圣恩^{1,2}, 陈小妹¹

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 福州大学土木工程防震减灾信息化国家地方联合工程研究中心, 福建 福州 350108)

摘要: 结合滑动摩擦耗能及塑性变形耗能机制, 设计了一种装配式摩擦-软钢耗能支座。该支座可看作包含摩擦板的滑动摩擦组件与软钢棒的组合, 属于一种功能分离式支座。滑动摩擦组件提供了支座的竖向和水平承载力, 以及大部分耗能; 而软钢棒增强了支座的屈服后水平刚度, 有效减小支座滑动位移, 破坏后便于更换。利用压剪试验机实测了摩擦-软钢耗能支座的摩擦系数及耗能性能, 后者包括滞回曲线、刚度退化曲线、单位滞回耗能及等效阻尼比等指标。最后提出了一种考虑承载能力系数的改进等效阻尼比。试验结果表明: 不同竖向荷载下支座的摩擦系数较为稳定, 软钢棒与摩擦板共同提供了支座的水平刚度和耗能能力, 支座的整体耗能性能良好。

关键词: 装配式摩擦-软钢耗能支座; 滞回曲线; 刚度退化曲线; 承载能力系数; 改进等效阻尼比
中图分类号: TU997; TU352.1⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0761-07

Design and Performance Tests of an Assembled Friction-soft Steel Energy Dissipation Bearing

FANG Shengen^{1,2}, CHEN Xiaomei¹

(1. School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. National & Local Joint Engineering Research Center for Seismic and Disaster Informatization of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: An assembled friction-soft steel energy dissipation bearing was designed that combines the energy dissipation mechanisms of sliding friction and plastic deformations. The bearing consists of a sliding friction assembly with a friction plate and some soft steel rods, and thus, belongs to the category of functional separation bearings. The sliding friction assemblies provide the vertical and horizontal bearing capacities, as well as most of the energy dissipation. The soft steel rods enhance horizontal stiffness after yield, effectively reducing the sliding displacements of the bearing. Meanwhile, the soft steel rods are easily replaced after failure. The friction coefficients, together with the energy dissipation performance, of the friction-soft steel energy dissipation bearing were measured and tested using a pressure-shear testing machine. The energy dissipation performance was embodied by hysteresis curves, stiffness degradation curves, unit hysteresis energy and equivalent damping ratios. Finally, an improved equivalent damping ratio considering the bearing capacity was proposed based on the testing results. It was found that the friction coefficient of the bearing is relatively stable under different verti-

* 收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2020-12-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578158)、福州市科技计划项目(2018-G-72)资助

作者简介: 方圣恩(1980—), 教授, 博导, 博士。主要从事结构健康监测/减隔震方面的研究。

E-mail: shengen.fang@fzu.edu.cn

cal loads. The soft steel rods and the friction plate jointly provide horizontal stiffness and energy dissipation capacity. In conclusion, the bearing offers satisfactory energy dissipation performance.

Keywords: assembled friction-soft steel energy dissipation bearing; hysteresis curve; stiffness degradation curve; bearing capacity coefficient; improved equivalent damping ratio

引言

数十年来随着我国桥梁建设的高速发展,桥梁抗震性能得到了高度关注。通过对减隔震技术的不断研究,学者们提出了不同类型的减隔震装置,主要有铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座、摩擦滑移支座及功能分离式减隔震等^[1-5]。高阻尼橡胶支座耗能性能较强,但其制作成本高,受温度影响大,耐久性差,使用相对较少^[1];铅芯橡胶支座隔震性能强,但横向刚度较小且存在铅污染问题^[2],使用有一定局限性^[3];摩擦滑移隔震具有易取材、低造价、竖向承载力大且适应性强等优点,但不具备竖向隔震作用,在竖向地震作用下的提高控制作用欠佳^[4]。此外,上述支座震后更换和修复都不容易,因此,研制一种适用性广、低成本且易拆卸的减隔震支座,对桥梁抗震来说非常有实用意义,比如支座可以组合不同耗能机制的装置。文献[5]提出了一种结合相互独立的滑动装置和剪切耗能装置,具有优良减震性能的功能分离式减隔震支座。刘聪等^[6]结合普通橡胶支座滑动效应和减震樵塑性耗能,提出了一种铁路桥梁用钢阻尼支座,并通过试验证明该支座具有稳定的滞回能力,能有效减小桥梁地震响应。庄鹏等^[7-8]结合摩擦支座滑动耗能效应和形状记忆合金塑性耗能提出了一种SMA弹簧-摩擦支座,通过试验发现该功能分离式耗能支座的滞回曲线饱满,耗能能力良好且具有一定的复位能力。

本文基于耗能功能分离思路,结合滑动摩擦耗能及软钢棒塑性耗能优点,考虑到震后修复及拆卸更换的便易性,设计了一种装配式摩擦-软钢耗能支座,其中滑动摩擦组件提供了支座的竖向和水平承载力,分担了大部分耗能;而软钢棒增强了支座的屈服后水平刚度,有效减小支座滑动位移,破坏后便于更换。利用压剪试验系统实测了支座的摩擦系数以及多种耗能性能指标,包括滞回曲线、骨架曲线、等滞阻尼比及刚度退化曲线等,并提出了一个改进等效阻尼比系数,以更好地评价支座的耗能性能。

1 摩擦-软钢耗能支座概念设计及工作原理

装配式摩擦-软钢耗能支座主要由哑铃型连接件、圆形摩擦板、软钢棒装配而成,如图1所示。该支座属于一种功能分离式支座,上下连接件、摩擦板和软钢棒间通过高强螺栓连接,通过现场装配的方式进行组装,便于维修更换。具体来说,上下两个哑铃型连接件分别与桥梁上部结构和桥墩进行连接,而摩擦板设于两个连接件之间,外侧圆周均布有螺栓通孔,软钢棒穿过通孔,再由螺帽将上下哑铃型连接件与摩擦板拴紧。

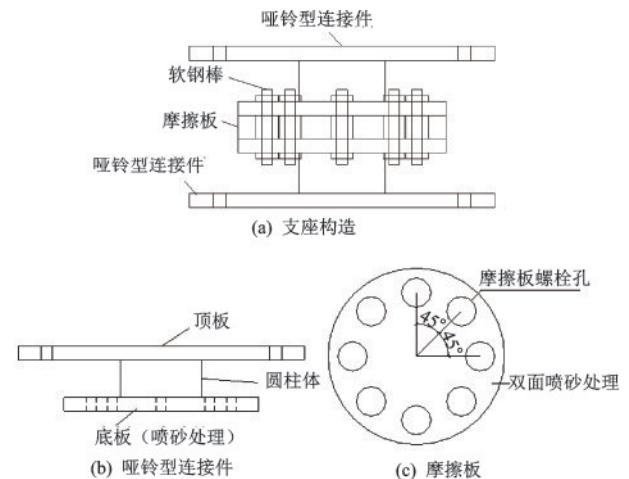


图1 装配式摩擦-软钢耗能支座构造示意图

Fig.1 Schematic diagram of friction-soft steel energy dissipation bearing

支座工作原理为:正常使用时,摩擦滑动支座在不发生横向变形情况下满足桥梁的大承载力和大位移需求。软钢棒可增强支座屈服后刚度,满足桥梁正常运营时动力性能方面的需求,有效减小支座滑动。温度荷载作用下支座发生微小位移,以释放结构的温度应力,保持结构在温度作用下的稳定性。在中、小震作用下,支座出现较大的位移,软钢棒进入塑性耗能阶段,通过往复滞回变形消耗地震作用于结构的能量,保证结构“中震不坏”;在大震

作用下,软钢棒在塑性变形到一定阶段出现断裂,退出工作,耗能模式转变为单一的摩擦耗能,仍可以耗散一定的地震动能,确保结构“大震可修”的设防目标。

该支座结构形式简单,通过高强螺栓连接,易于装拆;综合利用了软钢屈服耗能与板间摩擦耗能两种机制,任意水平方向上均具有变形耗能能力;震时以软钢棒破坏为主,受损后更换成本低。支座可单独或与其他类型支座联合使用,如图2所示。该支座已授权实用新型专利(专利号ZL201822110288.4)。

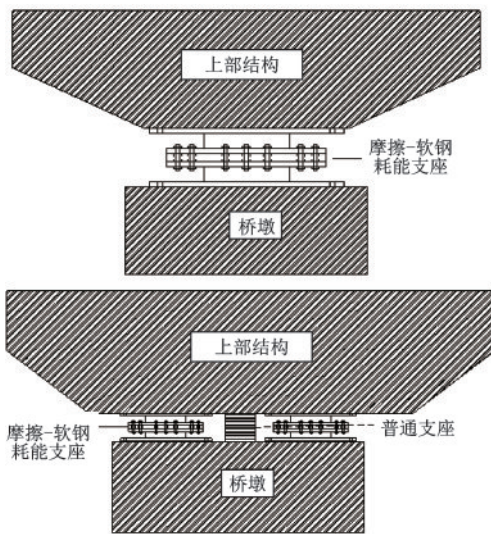


图2 摩擦-软钢耗能支座应用示意图

Fig.2 Potential application of friction-soft steel energy dissipation bearing

2 支座耗能性能试验

为了验证所设计支座的耗能性能,本文加工了一个产品小比例试样,其中摩擦板直径为360 mm,厚度为40 mm,板上螺栓孔直径为60 mm;软钢棒直径为18 mm,长130 mm。软钢棒采用BLY160钢材,屈服应力为178 MPa,弹性模量为203 GPa,泊松比为0.3;摩擦板和哑铃型构件采用45号钢,屈服应力为367 MPa,弹性模量为210 GPa,泊松比0.3。通过压剪试验系统对支座进行测试,包括摩擦板的摩擦系数测定以及支座体系的滞回性能。

2.1 摩擦系数测定

首先实测无软钢棒时支座在不同竖向力 P 作用

下的摩擦系数,如图3(a)所示。试验中对试件施加水平推力 F ,同时考虑到动摩擦系数的规律性与 P 相关,将竖向压力 P 取为1 000 kN和1 500 kN两种工况,加载频率取0.01 Hz,位移幅值为50 mm。1 000 kN下的试验与理论滞回曲线对比如图4所示,二者吻合良好。

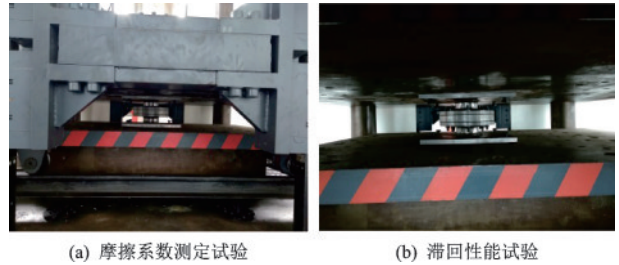


图3 摩擦-软钢耗能支座试验

Fig.3 Friction-soft steel energy dissipation bearing tests

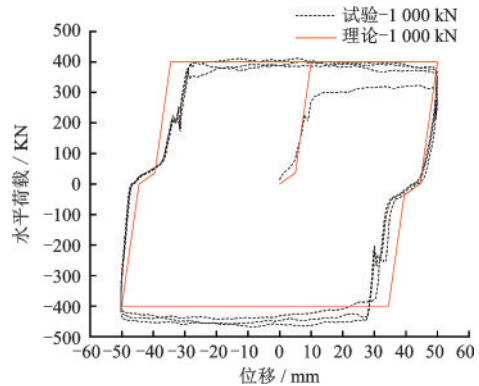


图4 摩擦板摩擦系数测试

Fig.4 Friction coefficient test on the friction plates

摩擦板与哑铃型连接件的上下两表面均有相对滑动,存在明显的临界滑动点;同一频率但不同 P 作用下,摩擦系数 μ 较为稳定。根据库伦摩擦公式(1),取各工况正、反向加载发生滑动的6个摩擦系数平均值,作为对应工况下支座的滑动摩擦系数,计算得到 $\mu=0.40$,精度为 ± 0.01 。

$$\mu = \frac{F}{P} \quad (1)$$

式中, F 表示接触面发生滑动时的水平力(kN)。

2.2 支座滞回性能

测定了摩擦板的摩擦系数后,进而测试安装了软钢棒完整支座的滞回性能,如图3(b)所示。整个加载过程维持 $P=1\ 000$ kN,水平力 F 变化,采用正弦波形式进行位移控制加载。从2 mm开始,大于5 mm时,每5 mm为一个量级,最大加载至50 mm,

加载频率仍为0.01 Hz,每个量级进行3次循环。

加载过程中摩擦板与哑铃型连接件摩擦面间均有稳定的相对滑动,软钢棒随着摩擦面间的相互错动而受到弯剪作用,发生弯剪变形,回正时可明显观察到软钢棒长度增长。当水平加载位移幅值达到50 mm时,软钢棒全部断裂,退出工作,断口呈圆锥形,具有一定的颈缩变形,如图5所示。摩擦板及哑铃型连接件的摩擦面产生金属碎屑,其他地方均完好无损,更换软钢棒后,可以重复使用。值得一提的是,碎屑会起到一定的润滑作用,使得摩擦系数降低。

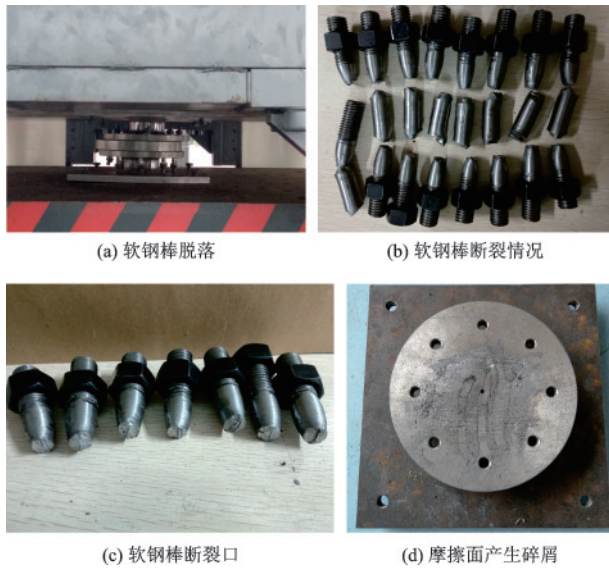


图5 滞回性能试验后现象
Fig 5 Phenomenon after hysteresis tests

3 试验结果分析

3.1 滞回曲线

摩擦-软钢耗能支座的试验滞回曲线如图6所示。随着水平加载位移增加,滞回曲线逐渐饱满,呈现稳定的纺锤形,表明摩擦-软钢耗能支座具有良好的耗能能力。在0~5 mm位移内,滑移现象比较明显,主要因为小位移下摩擦板与哑铃型连接件摩擦面间尚未完全贴合,此时荷载增长较慢,滞回圈较小;5~45 mm位移内,滞回圈逐渐饱满,其中20 mm幅值时支座稳定滑动,滞回曲线出现屈服后强化现象;达到45 mm位移时,荷载值达到最大,此时软钢棒全部进入强化阶段,部分开始断裂;50 mm位移幅值下软钢棒全部断裂,退出工作,屈服后刚度降为0,此时支座的耗能机制转为单一的摩擦耗能,仍

能消耗部分能量,确保结构具备一定的抗震性能。支座滞回曲线依旧保持较为饱满的形状,说明具备良好的耗能能力,但荷载幅值降低,摩擦系数由0.40降为0.37,这是因为摩擦面产生的碎屑起到了一定的润滑作用。

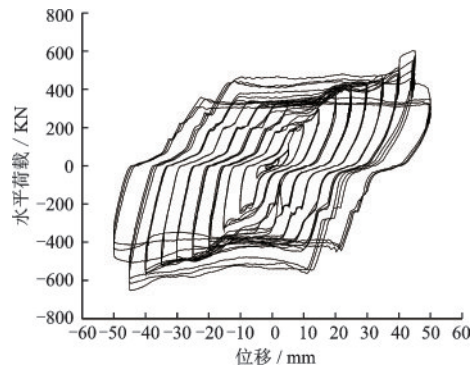


图6 实测滞回曲线
Fig.6 Experimental hysteresis curves

3.2 骨架曲线

骨架曲线是每次循环加载达到的水平力最大峰值轨迹,反映了构件受力与变形各阶段的强度、刚度、延性等指标。摩擦-软钢耗能支座的实测骨架曲线如图7所示,曲线正、反向加载的形状较为对称。0~5 mm水平加载位移阶段,软钢棒尚未发挥作用,主要由摩擦板提供水平刚度,支座水平承载力相对较小;5~10 mm阶段,承载能力迅速增强,此时支座未稳定滑动,刚度由软钢棒和摩擦板共同提供;10~20 mm阶段,软钢棒开始屈服,承载力增长速度相对较慢;20~45 mm阶段,支座进入稳定滑动状态,屈服后刚度由软钢棒提供,水平承载力继续增长,但增长速度较缓慢;45 mm以后,软钢棒陆续断裂并退出工作,支座水平承载力明显下降。

本文定义软钢棒的延性系数为其破坏位移与

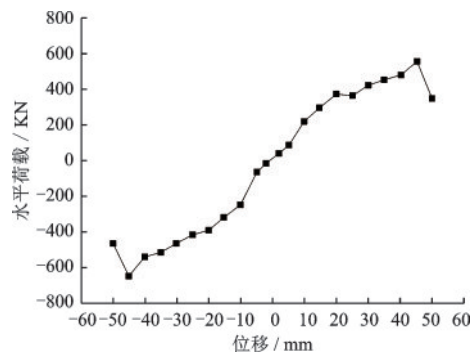


图7 实测骨架曲线
Fig.7 Experimental skeleton curve

屈服位移的比值。试验中 10 mm 加载位移时软钢棒发生屈服, 45 mm 时软钢棒开始发生破坏, 则软钢棒延性系数为 4.5, 延性较好。

3.3 刚度退化曲线

刚度退化是在往复循环荷载试验中构件的刚度随着水平位移的增大和循环次数的增加而不断减小的现象。本试验采用割线刚度来表示每次循环中支座的水平刚度:

$$K_i^j = \frac{|F_{ij}^+| + |F_{ij}^-|}{|u_{ij}^+| + |u_{ij}^-|} \quad (2)$$

式中, K_i^j 为第 i 级加载位移下第 j 周循环的峰值点所对应的割线刚度; u_{ij}^+ 和 u_{ij}^- 分别为此时峰值点正、负位移值; F_{ij}^+ 和 F_{ij}^- 分别为相应的正、负荷载值。

耗能支座的刚度退化曲线如图 8 所示。分析可得: 加载过程中支座的水平刚度是先增强后退化的; 0~5 mm 位移时, 由于压剪试验机孔隙及支座与设备间间隙等原因, 同时摩擦板与哑铃型连接件摩擦面间尚未完全贴合造成滑移, 使得刚度较低; 在 5~10 mm 位移阶段, 支座水平刚度开始增长, 10 mm 时等效刚度最大, 软钢棒与摩擦板共同提供水平弹性刚度; 10 mm 之后软钢棒开始屈服, 支座水平刚度开始降低; 15~45 mm 位移幅值时, 刚度退化趋势逐渐平缓, 说明在较大的塑性变形阶段, 支座的刚度退化缓慢, 表现出良好的工作稳定性; 45~50 mm 阶段, 由于软钢棒发生断裂破坏, 支座水平刚度迅速降低, 退化速度加快。

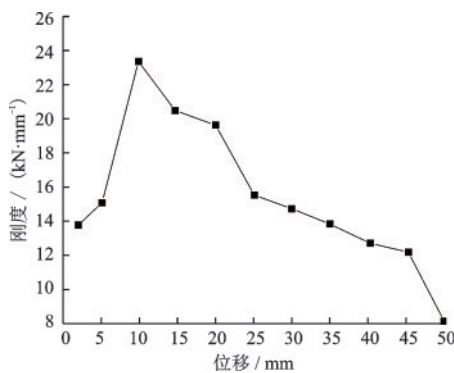


图 8 实测刚度退化曲线

Fig.8 Experimental stiffness degradation curve

3.4 耗能能力指标

3.4.1 单位滞回能量

本文采用单位滞回能量评估支座的耗能能

力。不同位移幅值下的单位滞回能量如图 9 所示: 在 0~5 mm 位移幅值内, 能量增长速度较慢; 5~45 mm 位移阶段内能量增长速度较快, 支座水平位移达到 45 mm 时能量最大; 45~50 mm 位移阶段, 单位滞回能量下降, 主要是因为软钢棒发生断裂后退出工作, 支座耗能机制转为单一的摩擦耗能机制; 50 mm 位移幅值时, 单位滞回能量虽有所下降, 但下降量较少, 仍可以耗散较多的地震动能。由此可见, 摩擦-软钢耗能支座的单位滞回能量随位移量增加而增大, 软钢棒增强了摩擦滑移支座的耗能能力。

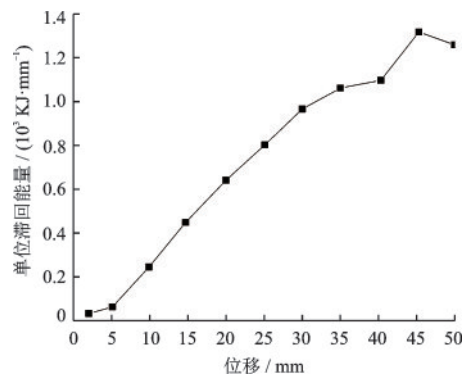


图 9 单位滞回能量

Fig.9 Unit hysteresis energy

3.4.2 等效阻尼比

等效阻尼比及单位滞回能量均是位移相关型阻尼器的重要耗能指标。等效阻尼比 ζ_{eq} 定义为^[9]:

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{E_D}{E_{so} + E'_{so}} \quad (3)$$

式中, E_D 为一个封闭滞回环的总包络面积; E_{so} 、 E'_{so} 分别为最大、最小幅值点(对应图 10 中 B 和 D 点)和原点的连线与位移轴所包围的面积。

支座等效阻尼比-位移曲线如图 11 所示。分析

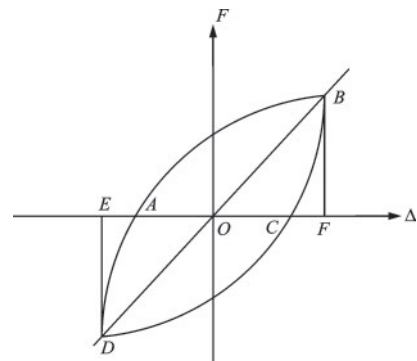


图 10 耗能滞回环

Fig.10 Hysteresis loop

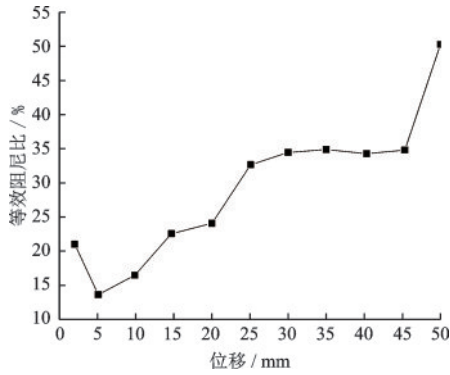


图 11 等效阻尼比位移曲线

Fig.11 Equivalent damping ratio-displacement curve

发现:屈服后刚度越小,滞回曲线越饱满,等效阻尼比越大。在 2 mm 位移幅值内,由于压剪试验机孔隙及支座与设备间间隙等原因,同时摩擦板与哑铃型连接件摩擦面间尚未完全贴合造成滑移,使得支座水平刚度较小,因此等效阻尼比较大;2~25 mm 阶段,支座水平承载力随着位移幅值的增大而增

$$\lambda_i = \frac{F_{+di} - F_{-di}}{\max((F_{+d1} - F_{-d1}), (F_{+d2} - F_{-d2}), \dots, (F_{+dj} - F_{-dj}))} \quad (5)$$

式中, F_{+di} 、 F_{-di} 分别为第 i 级位移幅值下的正向与负向最大承载力; $\max(\cdot)$ 为所有滞回圈中某个滞回圈的正负向承载力的合力最大值。

改进等效阻尼比-位移曲线如图 12 所示。在 0~45 mm 位移阶段,支座的 ζ_{eq} 单调增长,其中 25 mm 后 ζ_{eq} 值均在 15% 以上,表明摩擦-软钢耗能支座具有良好的耗能能力;位移达到 45 mm 后,软钢棒发生破坏并退出工作, ζ_{eq} 有所下降,但其值仍较大,说明支座可继续起到耗能作用。此外,对比图 9 可见, ζ_{eq} 曲线与单位滞回能量位移曲线形状相似,两者得出的耗能结果相同,验证了改进指标的正确性。

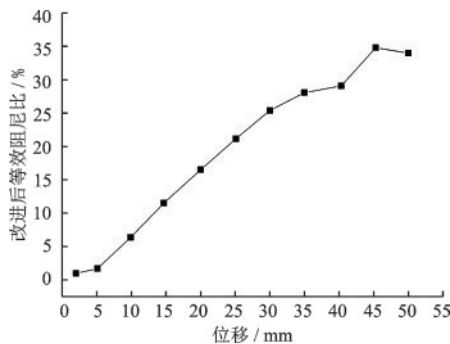


图 12 改进等效阻尼比曲线

Fig.12 Improved equivalent damping ratio curve

大,而滑移量不变,因此滞回曲线随着位移幅值增大逐渐饱满,等效阻尼比也随着位移幅值的增大而增大;25~45 mm 阶段,屈服后刚度趋于稳定,因此等效阻尼比趋于稳定值 35%,耗能性能良好;在 45~50 mm 阶段,由于软钢棒断裂退出工作后支座耗能机制转为单一的摩擦耗能,导致屈服后刚度大幅度下降,等效阻尼比大幅度增加,但因支座水平承载力下降,单位滞回耗能能力反而下降。

3.4.3 改进等效阻尼比

等效阻尼比未能考虑支座水平承载能力的变化,使得基于等效阻尼比与基于单位滞回能量判定的支座耗能能力出现差异,前者难以全面判定支座的耗能能力。因此,本文提出一种考虑了承载力系数 λ 的等效阻尼比,以准确判定支座(阻尼器)的耗能能力,适用性更好。

$$\zeta_{eq} = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{E_D}{E_{so} + E'_{so}} \quad (4)$$

4 结 论

结合支座滑动摩擦耗能及软钢棒塑性变形耗能等优点,设计并制作了一种易拆装的装配式摩擦-软钢耗能支座,并进行耗能性能试验,得到以下结论:

(1) 不同竖向荷载下支座的摩擦系数较为稳定,往复加载循环后摩擦板的摩擦系数会因金属屑屑而有所下降。

(2) 达到一定水平加载位移量时,软钢棒开始发挥作用,与摩擦板一起提供较大的水平刚度。软钢棒延性较好,不仅增强了耗能支座的耗能能力,同时增强了耗能支座的屈服后刚度。

(3) 摩擦-软钢耗能支座滞回曲线饱满,具有稳定的滞回性能和良好的塑性耗能能力,即使软钢棒在大位移的情况下发生破坏,摩擦板仍为支座提供了良好的耗能能力。所提出的改进等效阻尼比系数可以更准确判定支座的耗能能力。

参考文献:

[1] Ahn I, Chen S S. Nonlinear model-based system identification of lead-rubber bearings[J]. Journal of Structural

- Engineering, 2008, 134(2): 318-328.
- [2] 范立础, 王志强. 我国桥梁隔震技术的应用[J]. 振动工程学报, 1999, 12(2): 173-181.
Fan L C, Wang Z Q. Application of seismic isolation technology for bridges in China[J]. Journal of Vibration Engineering, 1999, 12(2): 173-181. (in Chinese)
- [3] 张银喜, 郝红肖, 陈彦北, 等. 一种钢阻尼滑板橡胶支座设计与试验研究[J]. 铁道建筑, 2016(10): 29-31.
Zhang Y X, Hao H X, Chen Y B, et al. Design and experimental study on sliding plate rubber bearing with steel damper[J]. Railway Construction, 2016(10): 29-31. (in Chinese)
- [4] 樊水荣, 苏经宇, 曾德民, 等. 建筑基础摩擦滑移隔震技术及其应用[J]. 工程抗震, 1997(1): 39-43.
Fan S R, Su J Y, Zeng D M, et al. Friction-slip isolation technology of building foundation and its application [J]. Seismic Engineering, 1997(1): 39-43. (in Chinese)
- [5] 薛晓锋. 功能分离式减震支座的开发研究[D]. 西安: 长安大学, 2003.
Xue X F. Development of functional separation shock absorber supports [D]. Xi'an: Chang'an University, 2003. (in Chinese)
- [6] 刘聪, 高日, 李承根, 等. 铁路桥梁新型钢阻尼支座滞回性能研究[J]. 钢结构, 2019, 34(2): 60-63.
Liu C, Gao R, Li C G, et al. Research on hysteretic behavior of an innovative steel damping bearing for railway bridges[J]. Steel Structure, 2019, 34(2): 60-63. (in Chinese)
- [7] 庄鹏, 薛素铎, 韩森. SMA 弹簧-摩擦支座滞回性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016, 36(4): 163-169.
Zhuang P, Xue S D, Han M. Experimental study of hysteretic performance of SMA spring-friction bearing [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 36(4): 163-169. (in Chinese)
- [8] 庄鹏, 薛素铎, 韩森. SMA 弹簧-摩擦支座基础隔震体系的地震响应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(2): 103-113.
Zhuang P, Xue S D, Han M. Seismic response analysis of the base isolation system using SMA spring-friction bearing [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2015, 35(2): 103-113. (in Chinese)
- [9] Chopra A K. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 2012: 103-105.

(本文责编: 赵霞)