

# 连续梁桥钢阻尼滑板支座隔震性能评价研究

彭强<sup>1,2</sup>, 王琦<sup>1,2</sup>, 夏樟华<sup>3</sup>

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室;  
3. 福州大学土木工程学院)

**摘要:**为了评价钢阻尼滑板支座在地震作用下的隔震性能,以一联两跨的连续梁桥为试验实桥,结合振动台试验,得到桥面板和盖梁在不同地震波作用下的加速度响应信号,利用加速度放大系数评价隔震性能。为克服响应峰值偶然性误差的影响,提出了考虑振动全过程的小波包能量谱的评价指标——能量比权值方差  $ERWV$ 。结果表明:桥面板相较于盖梁的动力响应在小波时频图中主要表现为频带能量向低频偏移;考虑振动全过程的能量比权值方差指标能够有效评价不同隔震支座的隔震能力;0.382g 地震作用下钢阻尼滑板支座纵桥向隔震效果要优于高阻尼和板式橡胶支座。

**关键词:** 隔震支座; 小波时频分析; 小波包能量谱; 评价指标

目前桥梁上使用的隔震支座主要有板式橡胶支座、高阻尼橡胶支座及钢阻尼滑板支座。1996年 Kelly 等通过振动台试验,分析了安装铅芯橡胶支座和低阻尼橡胶支座的桥梁结构动力响应,表明铅芯橡胶支座的隔震效果较好;2014年,吴忠铁对隔震结构进行了振动台试验,表明隔震体系的减震效果良好。钢阻尼复合滑板支座具有良好的隔震性能,逐渐应用于中小跨径装配式桥梁中,但是这种类型的支座桥梁没有得到振动台试验的验证,关于其隔震性能评价指标的研究也比较缺乏。

地震作用下,基于动力响应的隔震支座隔震性能评价是通过桥梁结构的加速度放大系数进行评定的,在评价支座隔震性能中有广泛的应用。但是由于地震具有很强的随机性和偶然性,不同结构对地震的响应也具有随机性和偶然性,仅仅通过加速度峰值判断结构的响应特性过于粗糙,并且桥梁结构在受到短时间的往复作用会出现随时间变化的各类参数变化,具有很强的非线性特性,因此需要对桥梁结构的振动全过程进行评价,克服振动过程中偶然性对峰值的影响。

而小波分析作为一种时频分析方法被广泛应用在土木工程领域,能够用于分析振动全过程而不丢失时间信息,被称为“数学的显微镜”,能够直观地表现出桥梁结构随时间变化的参数状态。

为了解决地震随机性对加速度放大系数指标的影响,建立考虑振动全过程的隔震性能评价指标,该文以某一联两跨的高速公路连续梁桥为试验桥梁,结合小波分析对不同地震动强度作用下的动力响应信号进行分析,以桥梁结构在小波时频分析图中的变化规律为基础,建立基于小波包能量谱的判定指标,对隔震支座的隔震性能进行评价。

## 1 基本情况

### 1.1 试验模型

该试验模型的实桥为福建某高速公路上的两跨连续梁桥,场地为二类场地,以抗震烈度Ⅷ度进行设防,结合振动台试验条件,确定试验模型比例为1:5,详细的相似系数见表1。综合考虑场地条件、地震动幅

- \*\*\*\*\*
- [5] 周孟波. 斜拉桥手册[M]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [6] 高宗余. 东海大桥主航道桥斜拉桥总体设计[J]. 世界桥梁,2004(S1).
- [7] 邵旭东. 长沙市洪山大桥的创新设计[J]. 中外公路,2005(2).
- [8] 强士中. 乌苏大桥大挑臂钢箱组合梁扭转性能试验研究[J]. 桥梁建设,2014(5).
- [9] 高宗余. 组合结构主梁斜拉桥设计进展[J]. 铁道勘察,2007(S1).
- [10] JTG/T D65-01-2007 公路斜拉桥设计细则[S].

值、频谱特性、地震动持时等条件,选择 3 条天然波 Northridge 波、El-Centro 波和 Tar-Tarzana 波,输入方向为纵向,加速度峰值分别为 0.96、2.00 和 3.82  $\text{m/s}^2$ 。桥面板布置 5 个 X 向和 5 个 Y 向加速度传感器、盖梁布置 6 个 X 向和 6 个 Y 向加速度传感器。

1.2 隔震支座参数

板式橡胶支座[图 1(a)]是由橡胶和钢板分多层叠加而成,可采用双线性理想弹塑性本构模型(图 2)模拟;高阻尼橡胶支座[图 1(b)]是采用高阻尼特性的胶料制成的橡胶支座,钢阻尼滑板支座[图 1(c)]由四氟乙烯滑板橡胶支座和钢阻尼器组合而成,两类支座均可采用双线性恢复力本构模型(图 3)模拟。3 类支座的具体本构参数见表 2~4。

表 1 振动台试验设计相似常数

类型	物理量	量纲	相似常数
几何尺寸	长度 $l$	[L]	0.20
	应力 $\sigma$	$[\text{FL}^{-2}]$	1.00
	应变 $\epsilon$	—	1.00
材料特性	弹性模量 $E$	$[\text{FL}^{-2}]$	1.00
	质量密度 $\rho$	$[\text{FL}^{-4}\text{T}^2]$	4.02
	集中荷载 $F$	[F]	0.04
荷载	力矩 $M$	$[\text{FL}]$	$8.00 \times 10^{-3}$
	时间 $t$	[T]	0.40
	质量 $m$	$[\text{FL}^{-1}\text{T}^2]$	$1.28 \times 10^{-4}$
动力性能	自振频率 $\omega$	$[\text{T}^{-1}]$	2.50
	速度 $v$	$[\text{LT}^{-1}]$	0.50
	加速度 $a$	$[\text{LT}^{-2}]$	1.25

1.3 加速度放大系数指标

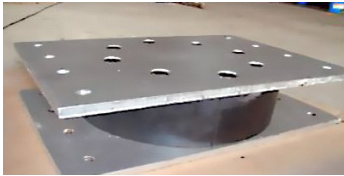
连续梁在 0.096g 和 0.2g 地震动强度作用下,加速度放大系数值相差不大,3 种隔震支座的隔震效果相差不大。以 Northridge 地震波为例,在 0.382g 地震强度作用下时,板式橡胶支座、高阻尼橡胶支座、钢阻尼滑板支座的加速度放大系数分别为 1.24、0.85、0.55。由此可见,钢阻尼滑板支座在强震作用下加速度放大系数最小,表明结构的响应越小,隔震性能越好。

加速度放大系数虽然能够对隔震支座的性能进行评价,但是存在一定的误差,主要表现在:

(1) 地震作用有很强的随机性,其振动的时间长度、强度等特性都只能通过概率理论进行推测,并且结构在不同的地震波作用下,响应差异很大,仅仅查看结构的响应峰值过于单一。



(a) 板式橡胶支座



(b) 高阻尼橡胶支座



(c) 钢阻尼滑板支座

图 1 桥梁隔震支座类型

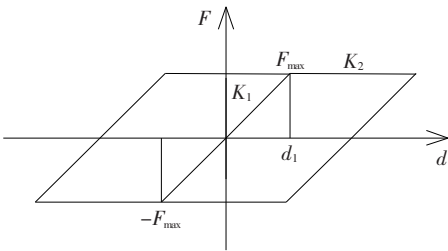


图 2 双线性理想弹塑性模型

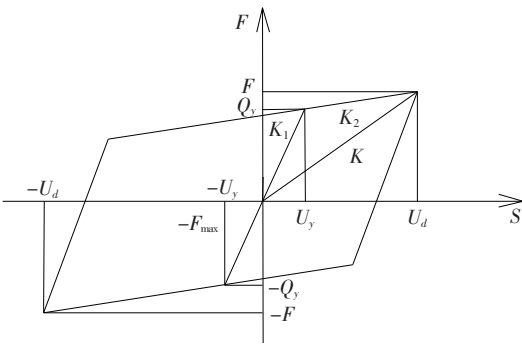


图 3 双线性恢复力模型

表 2 板式橡胶支座参数

竖向承载 力/kN	初始刚度 $K_1/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	位移 $d_1/\text{mm}$	设计位 移/mm	剪切模 量/MPa
60	1 607	2	10	1.0

(2) 地震属于高强度的短时往复作用,结构在地震作用下,其基频、刚度等都会随着时间的变化而变化,因此结构的响应峰值具有较强的随机性和偶然性,

表 3 高阻尼橡胶支座参数

竖向承 载力/ kN	屈服力 $Q_y$ / kN	初始刚 度 $K_1$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	屈服后刚 度 $K_2$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	设计位 移 $U_d$ / mm	剪切 模量/ MPa
60	2.36	3 820	590	30	0.8

表 4 钢阻尼滑板支座参数

竖向承 载力/ kN	屈服力 $Q_y$ / kN	屈服位 移 $U_y$ / mm	初始刚 度 $K_1$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	屈服后刚 度 $K_2$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	摩擦 系数	设计 位移/ mm
30	2	3.2	625	18.9	0.04	30

并不具备代表性。

综上所述,有必要对整个振动过程的动力响应进行评价。而小波分析作为一种时频分析方法被广泛应用在土木工程领域,能够用于分析振动全过程而不丢失时间信息,能够直观地表现出桥梁结构随时间变化的参数状态。

2 小波分析概述

小波分析与传统的傅里叶变换相比,它提供了一种新的视角和方法,以具有紧支特点的小波代替三角函数为基函数,是调和分析发展史上的里程碑。

2.1 小波时频分析

小波时频分析能够把桥梁结构动力响应的频率变化直观地表现在时间轴上,是由小波尺度图转化而来。基于 Matlab 平台,对信号进行小波时频分析,需要使用 tfrscalco 函数,具体使用方法如下:

$$[tfr,t,f,wt]=tfrscalco(x,t,wave,f_{\min},f_{\max},n,trace) \tag{1}$$

式中: $x$  为用来分析的信号; $t$  为小波时频分析的时域范围; $wave$  为 Morlet 分析小波的半长度,如果  $wave=0$ ,则用 Maxican hat 小波; $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$  为对信号进行分析的频率上、下界; $n$  为频率点数; $tfr$  为时频分析结果矩阵。

2.2 小波包能量谱判定指标

小波包分解能够同时完成信号低频和高频上的同时分解,能够完整地表达振动信号信息,利用小波包能量谱建立判别指标用来判定隔震支座的隔震性能。利用小波包分解信号,得到结构在不同分解尺度下的动态响应,进而得到每个频带的能量分量  $E_{i,j}$ 。

$$E_{i,j}=\sum |f_{i,j}|^2 (j=0,1,2,\cdots,2^i-1) \tag{2}$$

$$E_t=\sum_j E_{i,j} \tag{3}$$

式中: $i$  为分解层数; $j$  为小波函数对应的时间位置; $f_{i,j}$  为不同分解尺度上结构的动力响应, $f_{i,j}$  中包含  $l/(2i)$  个小波系数值; $E_t$  为所有频带的总能量。

根据得到的频带能量分量和总能量计算隔震性能判别基本参数  $I_p$ ,  $I_p$  定义为每个频带能量与总能量的比值,基本参数  $I_p$  是隔震性能指标建立的基础。

$$I_p=\frac{E_{i,j}}{E_t} \tag{4}$$

式中: $I_p$  为隔震性能判别参数; $E_{i,j}$  为结构第  $i$  层频带能量。

进一步定义基于不同频带能量变化比的隔震性能评价向量  $ERV$ ,用来判定桥面板和盖梁的频带能量变化。

$$ERV=\{ERV_p\}=\{I_{pd}-I_{pc}\} \tag{5}$$

式中: $I_{pd}$ 、 $I_{pc}$  分别为桥面板和盖梁的判别参数值。

常用指标的建立都是以向量  $ERV$  为基础,并没有考虑频带能量变化比的权值问题,完全忽略了频带能量对于指标的贡献,为增强部分频带能量的变化所引起的指标响应,建立考虑指标权值的能量谱判别指标能量比加权方差  $ERWV$ ,指标值越大,表明评价向量  $ERV$  低频带能量占比越高,支座的隔震效果越好。

$$\overline{ERV}=\frac{\sum ERV}{2^i} \tag{6}$$

$$ERWV=\sum_{k=1}^i (ERV_k-\overline{ERV})^2 (2^{i-k}) (k=1,2,\cdots,i) \tag{7}$$

式中: $i$  为小波包分解层数; $ERV_k$  为向量  $ERV$  第  $k$  个参数。

3 连续梁桥隔震支座效果评价

3.1 小波时频域特征分析

利用 tfrscalco 函数对动力响应数据进行小波时频分析,得到小波时频图,能够将桥梁结构响应的频率随时间变化的全过程展现出来。并且基于桥面板和盖梁的动力响应数据提出小波能量比加权方差指标,相较于对比桥面板和振动台的数据,忽略了一部分结构自身体系抗震能力的影响,仅仅考虑隔震支座的隔震能力,更为准确地判定隔震支座的隔震性能。

在 0.096g 和 0.2g 地震动强度作用下,3 种支座隔震效果相差不大,在 0.382g 地震动强度作用下,盖梁和桥面板的动力响应表现出较为明显的差异,主要

表现为频带能量往低频偏移,相较于盖梁频带能量表现为一定程度上的时间滞后。图 4 为安装了钢阻尼滑板支座在 Northridge 波加速度峰值  $0.382g$  作用下盖梁和桥面板的时频分析图。

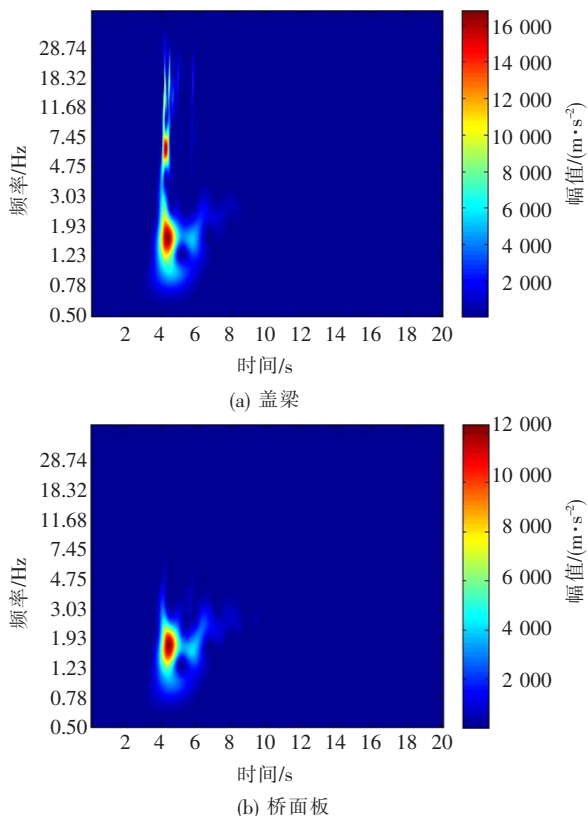


图 4 钢阻尼滑板支座小波时频分析图

从图 4 可以得到:

(1) 在地震动强度较小时,盖梁与桥面板的时频图变化并不明显,在地震动强度为  $0.382g$  时出现较为明显的变化。

(2) 对于钢阻尼支座,桥面板时频图相较于盖梁时频图的高频成分消失,仅仅保留了低频,能量幅值减小,也存在频率分布时间滞后现象。

### 3.2 隔震支座的隔震性能评价

从图 4 能够较为明显地看出桥梁结构在振动全过程的频率变化规律,为了将这些规律量化,进一步建立基于小波包能量谱的能量比权值方差  $ERWV$  指标。以钢阻尼隔震支座为例,对 Northridge 波和 EI-Centro 波下桥面板和盖梁的加速度响应信号进行小波包分解,分解层数为 6 层,小波包分析基函数为 Db20 小波,根据式(4)计算小波包分解的频带能量比值,即评价参数  $I_p$ ,见图 5。从图 5 可看出:桥面板的动力响应相较于盖梁来讲,小波能量中心向低频带移动,进一步

验证了隔震支座在地震作用下的隔震特性。

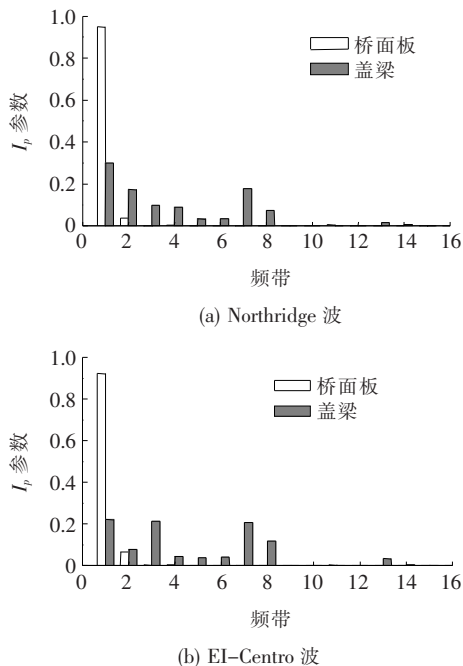


图 5 钢阻尼滑板支座评价参数  $I_p$

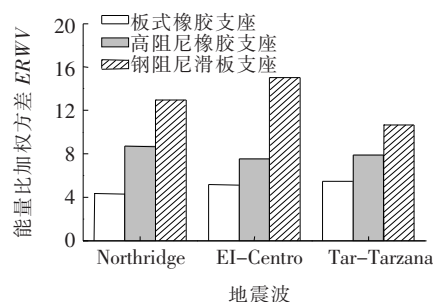
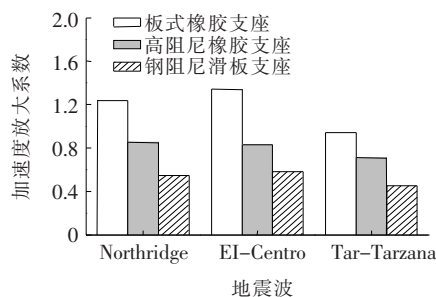
由于在  $0.096g$  和  $0.2g$  地震动强度作用下,3 种隔震支座的隔震效果相差不大,故以  $0.382g$  地震动强度作用下的隔震动力响应进行判定。以评价参数  $I_p$  为基础,根据式(5)计算得到 3 种隔震支座在不同地震波作用下的能量比加权方差  $ERWV$  指标如图 6(a)所示。 $ERWV$  值越大,表明评价向量  $ERV$  低频带能量占比越高,支座的隔震效果越好。从图 6(a)可以看出:隔震支座在不同地震波作用下的隔震效果是不同的,钢阻尼滑板支座在 Northridge 波下的能量比权值方差  $ERWV$  值达到了 12.95,在 EI-Centro 波下的能量比权值方差  $ERWV$  值达到了 15.07,远大于板式橡胶支座和高阻尼橡胶支座的评价指标值。

图 6(b)为 3 种隔震支座在不同地震波作用下加速度放大系数变化。由图 6(b)可以看出:

(1) 在  $0.382g$  的地震动强度作用下,钢阻尼滑板支座的隔震效果比高阻尼橡胶支座和板式橡胶支座的隔震效果要好。

(2) 两种指标最终的评价结果虽然一致,但是能量比权值方差  $ERWV$  指标是从能量的角度出发,依据隔震支座对结构振动响应影响的本质规律,并且考虑结构振动响应的全过程建立起来的,而加速度放大系数仅仅考虑了结构加速度响应峰值,忽略了地震作用下的结构随时间变化的参数改变,存在一定的随机性和偶然性。



(a) 能量比加权方差  $ERWV$ 

(b) 加速度放大系数

图6 两类指标的评价结果

## 4 结论

以某一联两跨的高速公路连续梁桥为试验实例,得到桥梁结构在地震作用下盖梁和桥面板的动力响应,以此为基础展开分析,依据小波时频分析图的特点,提出了考虑振动全过程评价指标  $ERWV$ ,得到如下结论:

(1) 基于两跨连续梁桥振动台试验数据提出了小波时频图分析方法,能够得到振动全过程的频率变化。从小波时频图中,揭示了隔震支座隔震的本质规律,主要表现为频带能量向低频段偏移,并存在一定程度上的时间滞后,依据此规律建立了能量比权值方差指标  $ERWV$ 。

(2) 针对隔震支座的评价指标  $ERWV$  提供了一种新的视角,从能量的角度出发,依据隔震支座对结构振动响应影响的本质规律,并且考虑结构振动响应的全过程,避免了振动响应峰值的随机性和偶然性,能够有效地对支座的隔震性能进行评价。

(3) 基于桥面板和盖梁的动力响应数据提出小波能量比加权方差指标,相较于对比桥面板和振动台的

数据,忽略了一部分结构自身体系抗震能力的影响,仅仅考虑隔震支座的隔震能力,可更为准确地判定隔震支座的隔震性能。

(4) 在不同地震波作用下,隔震支座的能量比权值方差  $ERWV$  值表现不同,主要是和地震波的卓越周期有关。

(5) 能量比权值方差指标与加速度放大系数的评价结果一致,在  $0.382g$  的地震动强度作用下,钢阻尼滑板支座的隔震效果比高阻尼橡胶支座和板式橡胶支座的隔震效果要好。

## 参考文献:

- [1] 王凯. 连续梁桥减隔震支座参数设计与优化[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2014.
- [2] 李建中, 管仲国. 中小跨径板式橡胶支座梁桥新型隔震系统[J]. 中国公路学报, 2015(3).
- [3] 陈彦江, 郭凯敏, 李勇, 等. 桥梁高阻尼隔震橡胶支座性能试验研究[J]. 振动与冲击, 2015(9).
- [4] Kelly J M. Earthquake-Resistant Design with Rubber[M]. Springer London, 1997.
- [5] 忠铁. 考虑支座极限变形的串联隔震体系性能分析与振动台试验研究[D]. 兰州理工大学博士学位论文, 2014.
- [6] 夏樟华, 吴应雄, 张银喜, 等. 连续梁桥钢阻尼滑板支座隔震性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2017(6).
- [7] 赵丽洁, 杜永峰, 李万润, 等. 基于小波多分辨率分析的时变结构参数识别研究[J]. 工程力学, 2016(9).
- [8] 黄方, 张威振, 杨少红, 王爽. 高烈度区刚构桥抗震与减隔震技术研究[J]. 中外公路, 2017(6).
- [9] 马振霄, 贾少敏. 基于简化数值模型的高墩桥梁减隔震性能研究[J]. 中外公路, 2019(4).
- [10] Rosso O A, Martin M T, Figliola A, et al. EEG Analysis Using Wavelet-Based Information Tools[J]. J Neurosci Methods, 2006, 153(2): 163-182.
- [11] 刘涛, 李爱群, 丁幼亮. 基于小波包能量谱的大跨斜拉桥拉索损伤预警方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007(2).
- [12] 彭坤, 徐秀丽, 李雪红, 等. 板式橡胶支座滑动性能试验研究[J]. 中外公路, 2020(2).
- [13] 唐志, 刘军, 徐向东.  $\epsilon$ 型钢阻尼减震支座在连续箱梁桥中的减隔震应用效果分析[J]. 中外公路, 2019(2).