

# Comparison and Analysis of Seismic Measures of Long-span Continuous Railway Girder Bridges

Chaohua Yang

Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China

**Abstract:** The lock up device (LUD) and viscous damper are common dampers, the fuse damper has the functions of LUD and viscous damper due to its unique structure. Constructions of the three devices are different, and they also work in different ways. In order to compare the damping effect of three kinds of equipment and research numerical simulation methods in Midas Civil. On the basis of Midas model of Jiufeng minjiang bridge, the seismic response under the condition of rare earthquake and the damping effect of three kinds of dampers are studied. The time history analysis with or without damper was carried out under three rare earthquakes and compare the results of following indexes: The displacement of the top of fixed pier and sliding pier, the relative displacement of pier and beam, the shear force on the top of pier and the bending moment at the bottom of pier under three conditions: no dampers, setting LUD and setting viscous dampers. The results show that both viscous dampers and LUD of the same tonnage have a certain damping effect on continuous girder Bridges, but for seismic response of each pier, the LUD are better than the liquid viscous dampers to a certain degree.

**Keywords:** Long-span continuous railway bridge; Seismic isolation; Liquid viscous damper; Lock up device

## 铁路长联大跨连续梁桥减隔震措施对比分析

杨超华

重庆交通大学, 重庆, 中国, 400074

**摘要:** 速度锁定器和黏滞阻尼器是较为常用的减震阻尼器, 熔断阻尼器以其独特的构造兼具有速度锁定器和黏滞阻尼器的功能。三种设备不仅在构造上不同, 而且工作原理也不相同。为了比较速度锁定器、黏滞阻尼器和熔断阻尼器三种设备的减震效果以及研究三种设备在 Midas 中的数值模拟, 以铁路长联大跨连续梁桥减隔震措施为背景, 建立了九峰岷江特大桥 Midas 模型, 研究其在罕遇地震工况下的地震反应及相同吨位的三种阻尼器的减震效果。在三个罕遇地震下进行了有无阻尼器情况下的时程分析, 对无阻尼器、设置速度锁定器和设置黏滞阻尼器三种情况下固定墩及滑动墩墩顶位移、墩梁相对位移、墩顶剪力及墩底弯矩的大小进行了对比。研究表明: 相同吨位的黏滞阻尼器和速度锁定器对连续梁桥均有一定的减震效果, 但就每个桥墩的地震反应来说, 速度锁定器在一定程度上其减震效果要好于液体黏滞阻尼器。

**关键词:** 长联大跨铁路连续梁; 减隔震; 液体黏滞阻尼器; 速度锁定器

### 1 引言

长联大跨连续梁桥为适应梁体的自由变形, 通常在纵桥向仅设置一个固定支座, 其余均设为滑动支座, 在罕遇地震工况下, 传统的延性设计方法已经不能满足抗震需求<sup>[1]</sup>。减隔震设计能很好的满足这一需求, 常用在长联大跨连续梁桥上的主要有液体黏滞阻尼器和速度锁定器。

近年出现的新型带熔断装置的锁定装置既可以用来控制制动力荷载, 熔断后可以抵抗桥梁在罕遇地震下的作用力。马良喆<sup>[2]</sup>等介绍了几个具有特殊功能的

液体黏滞阻尼器的设计使用, 包括新型带熔断的锁定装置。陈永祁<sup>[3]</sup>等系统地介绍国内外使用的几种阻尼器的计算公式、分析模型并介绍了它们的使用原则。阮怀圣<sup>[4]</sup>等介绍并对比了黄冈公铁两用长江大桥 5 种抗震支持体系的地震响应, 得出黏滞阻尼器抗震体系在抵抗大地震时具有明显成效。B. P. Pritchard<sup>[5]</sup>介绍了速度锁定器的动力测试性能和其在抵抗制动力方面的应用。Warren M. Brown<sup>[6]</sup>介绍了南亚地区桥梁上速度锁定器的设计、安装和它在桥梁上的减震作用。虽然已有实际工程运用熔断阻尼器, 但是对于相同吨位

的三种设备的数值模拟及减隔震对比分析相对做的工作较少。

本文建立了 90m+3x180m+90m 的九峰岷江特大桥 Midas 模型, 在罕遇地震工况下对比了黏滞阻尼器、速度锁定器和熔断阻尼器的抗震性能, 对熔断阻尼器在 Civil 中进行了模拟, 对设置阻尼器下的地震响应进行了结果分析, 得出速度锁定器在长联大跨连续梁减隔震中的优越性。

## 2 减震设备工作原理

黏滞阻尼器、速度锁定器和熔断阻尼器这三种都是活塞形式的液体阻尼器。锁定装置和黏滞阻尼器除活塞上的小孔不同外, 产品的其他结构完全相同。熔断阻尼器是黏滞阻尼器的新产品, 它比一般的液体黏滞阻尼器多一个金属熔断装置。

黏滞阻尼器的工作原理是在地震作用下, 活塞杆反复运动带动油缸内的液体通过活塞上的孔隙使地震传递的机械能转换成热能耗散掉, 液体黏滞阻尼器是一种需要并且能够精确定量计算的减震产品。

锁定装置是内部结构经过简化的液体阻尼器, 它属于特殊的黏滞阻尼器。与黏滞阻尼器最大的不同是它不耗散能量<sup>[1]</sup>。它的工作原理是在地震或风振等作用下带动活塞杆运动, 当活塞杆运动速度大于速度开关  $V_0$  时, 装置锁定其作用相当于刚性连杆使活动墩变为固定墩。这样主梁在地震作用下的惯性力将通过所

有的固定墩共同分担, 减小了原有固定墩承担的弯矩和剪力来达到减震目的。

熔断阻尼器综合了速度锁定器和黏滞阻尼器两种设备。它在一般的液体黏滞阻尼器上多增加了一个金属熔断装置, 起到控制开关的作用。熔断保险片的设计阈值为  $F_0$ 。阻尼器在风荷载、刹车荷载及多遇地震工况下时, 其受力低于  $F_0$ , 金属片限制了阻尼器两端的相对运动, 其作用与锁定装置相同。在罕遇地震工况下, 金属保险片断裂, 它就变成大型抗震黏滞阻尼器。其计算模型为:

$$F = \begin{cases} 0 \sim F_0 & F < F_0 \\ CV^\alpha & F \geq F_0 \end{cases} \quad (1)$$

## 3 数值模型建立

### 3.1 桥梁结构模型

本文根据九峰岷江特大桥的设计图纸建立了 90m+3x180m+90m 的 Midas 模型, 该桥梁结构是由 5 跨连续梁组成, 边跨 90m, 中跨均为 180m, 属于长联大跨铁路连续梁桥。主梁宽 9.1m, 桥面为单线铁路, 移动荷载为中活载。每个主墩的高度均不相同, 由于高低墩的差异对整体的动力性能产生影响, 所以对全桥建立了完整的模型。模型中桥墩从左到右依次编号, 其中 4#墩为固定墩, 其余均为滑动墩, Midas 整体模型如下图所示。

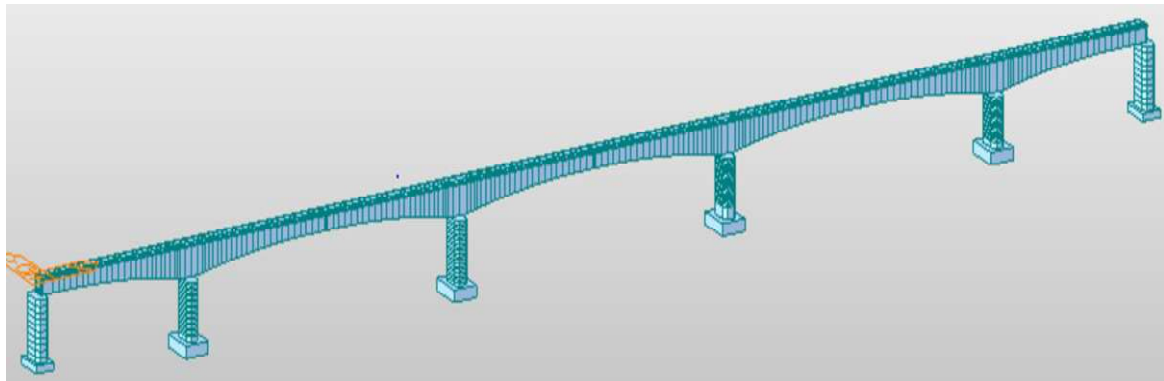


Figure 1. Jiufeng lancang bridge midas model

图 1. 九峰岷江特大桥 Midas 模型

### 3.2 地震作用输入

根据中国地震动参数区划图该地区抗震设防烈度为 7 度, 设计地震加速度值为 0.1g。本模型中采用动态时程分析法进行地震反应分析, 地震输入采用地震

动加速度时程<sup>[7]</sup>。根据设计加速度时程 50 年超越概率 2% 的罕遇地震工况下生成三条地震波, 最大加速度峰值为 0.19g<sup>[8]</sup>。地震波时程荷载函数如下图 2 所示。

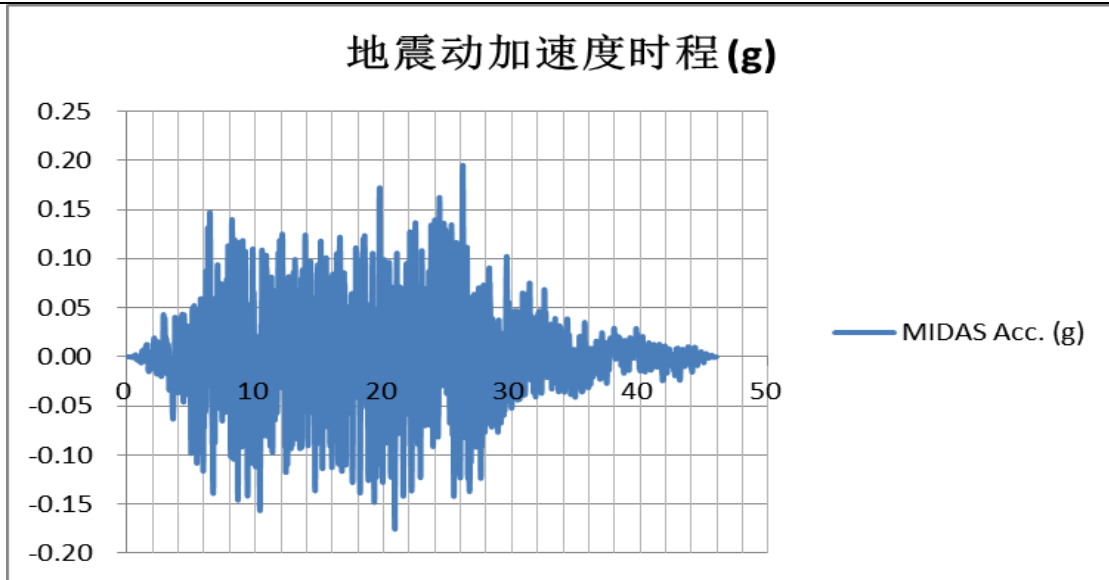


Figure 2. Time-span curve of ground vibration acceleration under rare earthquake conditions  
图 2. 罕遇地震工况下地震动加速度时程曲线

地震具有很强的随机性，不仅其大小是随机的，其方向也是随机的。在地震反应分析时，选择最不利的方向进行地震输入，本模型中只考虑顺桥向的地震反应。对三条地震波建立 3 个相应的时程荷载工况和时程荷载函数，本文不考虑行波效应的影响。三个罕遇地震工况时程分析均应接续在恒载荷载工况之后，这样时程分析结果均不含由于自重等恒载引起的初始内力<sup>[9]</sup>。

### 3.3 减震设备参数

为了对比黏滞阻尼器、速度锁定器和熔断阻尼器三者的减震效果，三种减震设备的最大阻尼力均设定为 2500kN，在 2#、4#、5#每个活动墩墩顶设置 4 个阻尼器。经过阻尼器参数优化后，最终确定了三种减

震设备的主要参数。

在 Midas 模型中进行抗震体系边界条件模拟时，黏滞阻尼器和速度锁定器的模拟均采用一般连接 Maxwell 模型进行模拟。二者的边界条件相似，只有模拟的参数取值稍有差别。熔断阻尼器由于在小震时其作用相当于速度锁定器，在大震时金属片熔断其作用相当于大型抗震黏滞阻尼器。在进行熔断阻尼器的边界条件模拟时，熔断阻尼器可分为两个模型分别进行边界条件的模拟：小震时边界条件按固定支座考虑，大震时边界条件按常规的黏滞阻尼器模拟，熔断阻尼器的参数与黏滞阻尼器参数相同，下表为减震设备的实际参数及在 Maxwell 模拟中的参数取值。

Table 1. Sticky damper parameters

表 1. 黏滞阻尼器参数

参数	取值	Maxwell 参数	取值
最大阻尼力(kN)	2500	消能器阻尼(kN)	2500
最大冲程(mm)	±300	参考速度(m/s)	0.6
阻尼系数 $C [kN \cdot (s / m)^\alpha]$	4000	连接弹簧刚度(kN/m)	18000
速度指数 $\alpha$	0.4	阻尼指数	0.2

Table 2. Speed Locker Parameters

表 2. 速度锁定器参数

参数	取值	Maxwell 参数	取值
----	----	------------	----

锁定最大力(kN)	2500	消能器阻尼(kN)	1000
最大冲程(mm)	±300	参考速度(m/s)	0.001
锁定速度(mm/s)	0.15	连接弹簧刚度(kN/m)	160000
等效刚度(kN/mm)	200	阻尼指数	2

## 4 地震响应对比分析

### 4.1 桥墩位移

#### 4.1.1 墩顶位移

在水平地震作用下，连续梁桥的位移以水平位移为主，竖向位移相对很小<sup>[10]</sup>。墩顶位移是表征结构地震响应的指标，若墩顶位移过大，则可能是支座发生了破坏，或墩底进入了塑性阶段。加设阻尼器后固定

墩墩顶位移呈减小趋势，滑动墩墩顶位移增大。本模型中除 3#墩为固定墩外，其余均为滑动墩，支座不考虑摩擦系数，因此在理论情况下活动墩墩顶位移近似为 0。

图 3 为固定墩在罕遇地震 3#波下的墩顶位移时程曲线，未加阻尼器时固定墩墩顶最大位移为 6mm，加设阻尼器后对固定墩墩顶位移影响不是很大。

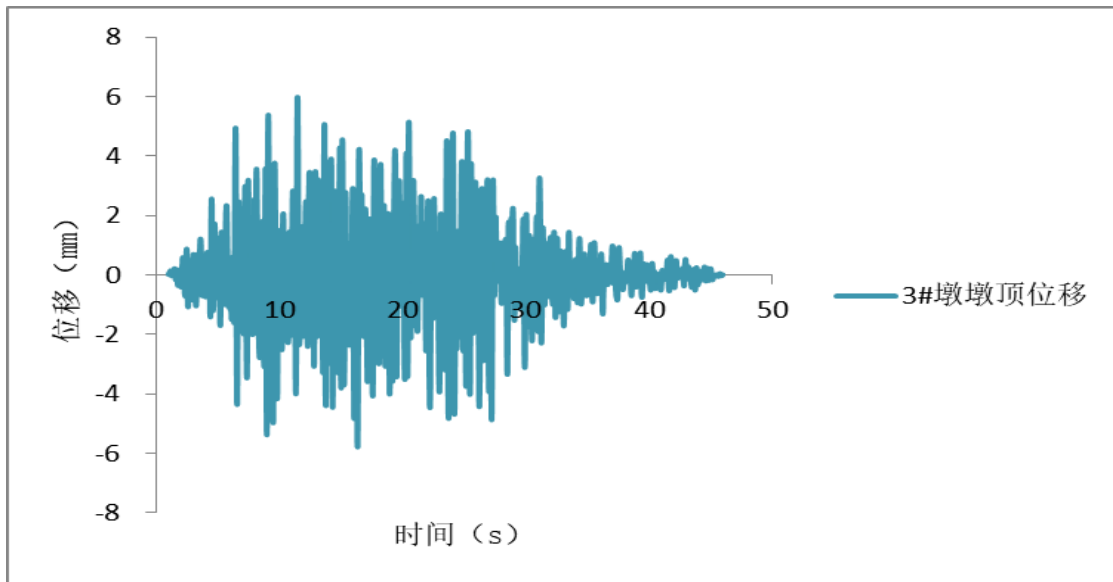


Figure 3. # Seismic wave, 3 # pier top displacement time curve  
图 3. 3#地震波，3#墩墩顶位移时程曲线

#### 4.1.2 墩梁相对位移

墩梁相对位移是桥梁上下部连接构件的相对位移，罕遇地震下，如果墩梁相对位移过大很可能造成落梁破坏<sup>[11]</sup>，在桥梁抗震设计中，控制桥梁上下部结构的相对位移，是防止落梁的根本措施<sup>[12]</sup>。墩梁相对位移为支座顶节点在恒载作用下的位移和在罕遇地震

波作用下的位移叠加。在长联大跨连续梁桥上加阻尼器后，可以减小墩梁相对位移。表 3 为连续梁桥 6 个主墩在罕遇地震工况下(3 条地震波)，在未设置阻尼器、黏滞阻尼器以及速度锁定器下墩梁最大相对位移的比较。

Table 3. Relative displacement of pier beams(mm)  
表 3. 墩梁相对位移(mm)

桥墩编号 震动编号		1#墩	2#墩	3#墩	4#墩 (固定墩)	5#墩	6#墩
1#	无阻尼器	71.6	75.4	47.3	35.9	76.3	69.7
	黏滞阻尼器	90.6	81.9	50.8	15.1	77.2	71.8
	速度锁定器	95.2	119.5	67.8	14.8	124.4	105.9
2#	无阻尼器	73.5	81.1	38	34.8	72.8	64.9
	黏滞阻尼器	93.5	111.3	46.1	11	112.7	94.9
	速度锁定器	102.4	120.3	48.8	12.8	117.2	97.8
3#	无阻尼器	60.8	70.5	46.4	38.7	79.4	71.3
	黏滞阻尼器	80.8	90.5	57.4	13.4	119.5	101.3
	速度锁定器	86.9	109	63.8	14.5	129.9	108.7

从上表中可知，设置阻尼器后固定墩墩顶相对位移有减小的趋势，加设阻尼器的滑动墩有 2#、3#、5#，其中 2#墩、5#墩墩顶相对位移增加较为明显，黏滞阻尼器和速度锁定器二者对于墩顶相对位移的控制没有太大相差，位移减震效果相当。

在 2#、3#、5#滑动墩墩顶与主梁底部分别安装 4 个 250t 的阻尼器，在地震波的激励下，阻尼器开始作用。虽然黏滞阻尼器和速度锁定器的工作原理不同，但二者均对墩顶剪力产生影响，下表给出了每个桥墩墩顶在三个地震波下的最大剪力。

4.2 墩顶剪力

Table 4. Pier top shear  
表 4. 墩顶剪力(kN)

桥墩编号 震动编号		1#墩	2#墩	3#墩	4#墩 (固定墩)	5#墩	6#墩
1#	无阻尼器	2723.3	521.7	659.9	65164.8	408.4	2520.8
	黏滞阻尼器	2722.5	4507.1	4598.7	52959.5	3142.4	2524.2
	速度锁定器	2721.9	6763.2	5823.1	61456.3	5533.9	2523.1
2#	无阻尼器	2904.4	563.4	695.7	62780.4	411.1	3008.7
	黏滞阻尼器	2900.6	4570.2	4254.9	52919.9	3305.5	3049.1
	速度锁定器	2903.2	6382.9	5329.7	57918.5	5318.9	3050.4
3#	无阻尼器	2631.4	586.4	675.2	56374.1	441.1	2711.1
	黏滞阻尼器	2626.9	4331.1	4503.5	49133.6	3023.8	2710.1
	速度锁定器	2627.3	5909.1	5324.6	44681.8	4127.6	2711.7

由表 4 可知，在安装阻尼器后，滑动墩墩顶剪力增大，固定墩墩顶剪力减小。未安装阻尼器的 1#墩和 6#墩其墩顶剪力变化较小。其中对比相同吨位的黏滞阻尼器和速度锁定器对墩顶剪力的影响，速度锁定器的对墩顶剪力的抗震效果均要好于相应的黏滞阻尼器。黏滞阻尼器主要通过活塞带动缸体内的液体来回运动耗散地震能量，而速度锁定器通过将滑动墩锁住，把滑动墩变为固定墩来增大整个结构的刚度，达

到重新分散和重新分配受力的效果，使每个桥墩受力更加均衡。

4.3 墩底弯矩

长联大跨铁路连续梁桥在顺桥向往往往只设置一个固定支座，其他均设为滑动支座，使得固定墩在地震作用下承受绝大部分主梁运动传下来的弯矩而滑动墩只承受少量的弯矩。在滑动墩墩顶设置阻尼器可以增

大滑动墩墩底弯矩而减小固定墩墩底弯矩。下表是每一个桥墩墩底在三个地震波下的最大弯矩值。

Table 5. Pier top shear(kN · m)  
表 5. 墩顶剪力(kN · m)

桥墩编号 震动编号		1#墩	2#墩	3#墩	4#墩 (固定墩)	5#墩	6#墩
1#	无阻尼器	262965.5	170100.7	232399.4	1169043.2	101936.2	225349.2
	黏滞阻尼器	262861.8	225814.4	260711.9	1057353.2	147872.5	260263.1
	速度锁定器	262072.5	211948.2	276184.8	1038797.9	152691.1	259918.2
2#	无阻尼器	300012.6	183063.2	248690.1	1128989.8	114834.2	288099.3
	黏滞阻尼器	300650.8	205207.2	255881.9	1016476.1	138162.6	288345.7
	速度锁定器	301350.6	208148.2	329694.6	1046317.1	147050.8	288927.5
3#	无阻尼器	286157.7	175721.6	231219.9	1249582.3	116120.1	263095.7
	黏滞阻尼器	287967.5	197372.1	225706.5	969577.2	133353.1	264870.1
	速度锁定器	288306.1	241603.4	249060.1	1044774.8	150085.6	264954.6

由表 5 可知, 设置阻尼器后, 滑动墩墩底弯矩明显增大, 固定墩墩底弯矩明显减小, 而未设置阻尼器的滑动墩墩底弯矩变化不大。相比较速度锁定器和黏滞阻尼器, 二者对长联大跨连续梁桥均有明显的减震效果, 黏滞阻尼器对墩底弯矩的影响要好于速度锁定器, 但影响幅度差别不是很大。

## 5 结论

在地震作用下, 长联大跨连续梁桥固定墩纵向剪力和弯矩较大, 滑动墩地震反应相对较小。在罕遇地震工况下, 固定墩承受较大的沿顺桥向的剪力, 在没有任何抗震措施的情况下容易发生剪切破坏。

黏滞阻尼器和速度锁定器在 midas 中可保守地采用 Maxwell 模型模拟, 由于二者的工作原理不同, Maxwell 模拟参数中参考速度和速度指数取值差别较大, 另外两个参数需经过多次调整失算, 直到一般连接时程分析得到的滞回曲线与实际实验得到的滞回曲线相接近为止。

黏滞阻尼器和速度锁定器对长联大跨连续梁桥均有较好的减震效果, 在墩顶位移和墩顶剪力控制方面, 速度锁定器均发挥良好的效果。相同吨位的阻尼器和速度锁定器在控制墩底弯矩方面, 都能大幅度的减小固定墩墩底剪力, 较大程度地增加滑动墩墩底弯矩。速度锁定器能够将地震工况下主梁运动产生地地

震力较为均匀地分担给每个滑动墩, 因此每个滑动墩剪力和弯矩增大地幅度比较一致, 而黏滞阻尼器则没有呈现出这样的规律。

## References (参考文献)

- [1] 李侠. 长联大跨连续梁桥减隔震设计方案比选[J]. 铁道建筑, 2014(6), 43-46.
- [2] 马良喆, 曹铁柱, 陈永祁. 具有特殊功能的液体黏滞阻尼器的设计与使用[C]// 中国公路学会桥梁和结构工程分会 2010 年全国桥梁学术会议. 2010.
- [3] 陈永祁, 耿瑞琦, 马良喆. 桥梁用液体黏滞阻尼器的减振设计和类型选择. 土木工程学报, 2007, 40(7), 55-61.
- [4] 阮怀圣, 李龙安, 杨光武, 等. 黄冈公铁两用长江大桥抗震技术研究[J]. 桥梁建设, 2013, 43(6), 34-39.
- [5] B. P. Pritchard. The use of shock transmission units in bridging: Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, 1997, 5(123), 241-244.
- [6] Warren M. Brown, TechStar Inc, USA. TechStar Lock-Up Devices & anti-seismic expansion joints in Southern Asia: IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-II, August 8-10, 2010, Dhaka, Bangladesh.
- [7] 铁路工程抗震设计规范 GB50111-2006(2009 年版).
- [8] 沈绍冬, 李钢, 潘鹏. 屈曲约束支撑与黏滞阻尼器的减震效果对比研究. 建筑结构学报, 2016, 37(9), 33-42.
- [9] 葛俊颖. 桥梁工程软件 midas Civil 使用指南. 2013.
- [10] 高玉峰, 蒲黔辉, 李晓斌. 大跨长联预应力混凝土连续梁桥地震反应分析. 工程抗震与加固改造, 2009, 31(2), 21-25.
- [11] 吴陶晶, 李建中, 管仲国. 减隔震装置作用机理及其在大跨度连续梁桥中的应用. 结构工程师, 2009, 25(4), 102-107.
- [12] 颜志华, 马良喆, 陈永祁. 速度锁定装置在津秦客运专线减震设计中的应用. 桥梁建设, 2014, 44(1), 95-100.