机车电传动 2017 年第 6 期 (2017-11-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №6, 2017(Nov. 10, 2017)

文章编号：1000–128X(2017)06–0006–05

高铁桥梁典型减隔震装置及其减隔震效能研究

宁响亮，夏俊勇，卜继玲，唐　璐，刘　军

（株洲时代新材料科技股份有限公司 轨道交通事业部，湖南 株洲　412007）

摘　要：论述了高铁桥梁进行减隔震设计的原理和必要性，介绍了国内外桥梁进行减隔震设计的标准规范和最常采用的装置以及国内在常用减隔震装置上取得的进展。对常见高铁简支梁桥缩尺模型，针对性地设计制造了摩擦摆支座和粘滞阻尼器，进行了中、低墩的振动台试验，试验数据表明其相对普通球型支座都具有良好的减隔震效能，摩擦摆支座尤其适合低矮墩结构，粘滞阻尼器尤其适用于高柔墩结构。文中还指出了摩擦摆支座剪力销结构的设计要点以及粘滞阻尼器设计中的注意事项。

关键词：高铁桥梁；振动台试验；摩擦摆支座；粘滞阻尼器；减隔震效能

中图分类号：U441^{+}.3；U238　　**文献标识码：**A

doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.002

Study on Typical Seismic Mitigation and Isolation Devices for High-speed Railway Bridges and Its Seismic Mitigation and Isolation Efficiency

NING Xiangliang, XIA Junyong, BU Jiling , TANG Lu, LIU Jun

(Rail Transportation Business Unit, Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412007, China)

Abstract: Necessity and principle of seismic mitigation and isolation design for high-speed railway bridges were expounded, and the norms and standards of seismic mitigation and isolation design both in domestic and overseas industry as well as its most popular devices were introduced,and progress on commonly used seismic mitigation and isolation devices in China. Based on scaled mode of simply support beam girder bridge that commonly applied in China, a typical pendulum and viscous fluid damper were designed and shaking table tests were carried out on middle & low pier separately, which illustrated that those devices had better performance than common spherical bearing in terms of seismic mitigation and isolation. In particular, pendulum was quite suitable for low-pier structure while viscous fluid damper for high-rise and flexible piers. Finally, the paper reviewed the key points for design, such as shear-keys design for pendulum and design attentions for viscous damper.

Keywords: high-speed railway bridge; shaking table test; pendulum bearing; viscous fluid damper; seismic mitigation and isolation efficiency

0　引言

国内外的地震灾害表明，震区桥梁的损坏坍塌，不仅阻碍当时的救灾行动，而且影响灾后的恢复重建工作。桥梁工程为生命工程，必须采取有效的抗震和减震措施。为此不少国家都为桥梁抗震要求制定了相应的标准或者规范，如我国《公路桥梁抗震设计细则》（JTG/T B02-01—2008）[1]、美国加利福尼亚州的《抗震设计准则》(1999)[2]、美国《AASHTO 荷载与抗力系数桥梁设计规范》(2007)[3]、欧洲规范《结构抗震设计—第 2 部分：桥梁》(EN 1998-2：2005)[4]、日本《公路桥梁设计规范》(2002)[5] 和新西兰《桥梁手册》(1994)[6]。另外，还涉及了其他一些资料和标准，如 ATC-32[7]、

收稿日期：2017–10–10
基金项目：国家自然科学基金项目（51778024）

国际标准 ISO 3010—2001[8] 等。

人们在长期抵御地震灾害的过程中积累了丰富的经验，桥梁抗震技术已从传统的、被动的抗震方法向主动的、积极的减震隔震方法过渡[9]。在桥梁减隔震技术的应用上，重点研究在突发强震中确保桥梁结构的安全，采取安全有效、合理、经济的结构体系，通过衰减地震力 (所谓减震)，或者阻断地震力的传递 (所谓隔震)，或者两者并用以保护工程主体结构免遭地震力破坏。目前国内外较为普遍采用的桥梁减隔震装置有摩擦摆支座、粘滞阻尼器、铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座、弹塑性钢阻尼器等。

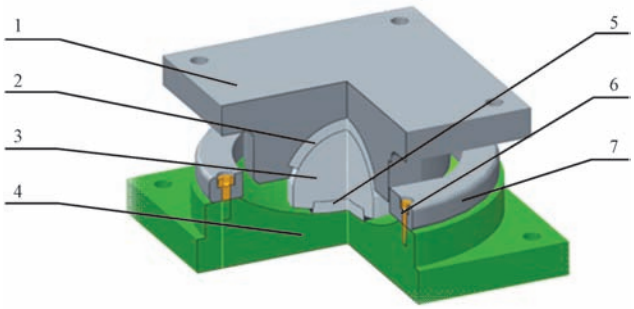
我国地处环太平洋地震带和欧亚地震带之间，受太平洋板块、印度洋板块和菲律宾板块的挤压，地震断裂带十分活跃，是一个地震灾害严重的国家。我国的地震活动具有频次高、强度大的特点，分布十分广泛。高铁线路在技术上为了保证平直性、平顺性、防沉降性等，大量采用了桥梁和隧道结构。目前国内高铁线路减隔震装置应用最多的是摩擦摆支座，如沪昆线云南段、云桂线、成兰线等简支梁桥已大批量应用；其次是粘滞阻尼器，如钱江铁路新桥、京沈客运专线北京潮白河大桥、昌吉赣客运专线赣州赣江特大桥等；还有弹塑性钢阻尼器，如贵广线北江特大桥、思贤窖特大桥、昆明铁路枢纽东南环线等。对这几种减隔震装置，近年国内的研究越来越深入与全面，发展很快。如对摩擦摆支座，文献 [10] 提出了对耐磨板耐热性能的要求，文献 [11] 对经典摩擦摆支座结构理论进行了大幅修正。对粘滞阻尼器，文献 [12] 对粘滞阻尼器孔缩力理论进行了修正，标准《桥梁用粘滞流体阻尼器》（JT/T 926—2014）[13] 已颁布实施。文献 [14–15] 研究了不同形状的型钢弹塑性阻尼器，并对其进行了疲劳性能研究。

在减隔震效能的试验研究方面，文献 [16–17] 通过振动台试验对摩擦摆支座进行了减隔震效能研究，文献 [18–19] 通过振动台试验对粘滞阻尼器进行了减隔震效能研究。从公开文献中可以看出，目前在减隔震效能的试验研究主要针对公路桥梁，而针对高铁桥梁减隔震效能的试验研究鲜有报道，因而通过对常见高铁桥简支梁缩比模型进行振动台试验，较常规的有限元分析更接近实际地验证减隔震装置在高铁桥梁上的减隔震效能，全面而系统地评估铁路桥梁减隔震设计的可靠性和安全性。本文将针对摩擦摆支座及粘滞阻尼器的设计和验证及其在高铁桥梁模型振动台试验中的减隔震效能展开研究论述。

1　摩擦摆支座及粘滞阻尼器本体设计与验证

1.1　摩擦摆支座的设计和验证

根据振动台试验设计情况，用 MIDAS 软件摩擦摆支座模块进行减隔震分析，得到摩擦摆支座的本体性能参数，包含竖向承载力、摩擦系数、隔震半径、滑动位移以及剪断力大小等。依据本体性能参数对摩擦摆支座进行结构设计，设计的摩擦摆支座由上转动板、挡圈、剪力销、球摆、下滑动板、转动耐磨板、耐热型耐磨板等组成，如图 1 所示。



1—上转动板；2—转动耐磨板；3—球摆；4—下滑动板；5—耐热型耐磨板；6—剪力销；7—挡圈

图 1　摩擦摆支座结构示意图

该摩擦摆支座结构具有以下特点：

①耐热型耐磨板在地震工况反复摩擦下能承受高温高压，保持性能稳定。

②剪力销结构设计为整体纯剪受力，力学状态简单清晰，剪断力可精确计算并已实现，避免了目前国内大量采用的“剪力销 + 螺栓”复合结构的复杂受力及剪断力不精确的情况。

③剪力销结构设计为整体一次剪断，与国内大量采用的在支座四边分别设置四组剪力销不同。本设计结构可实现不论从哪个水平方向受力，都可以在同一水平力剪断，避免了在每侧单独设置挡块时，不同水平力角度，剪断力必然不同且需多次碰撞剪断的缺点。

④保险销剪断后，限位装置不会飞出造成地震次生灾害。

试制摩擦摆支座之前，采用 ABAQUS 6.10 软件对摩擦摆支座进行数值模拟分析，得到摩擦摆支座的应力云图如图 2 所示。分析结果表明摩擦摆支座的力学性能满足要求，结构设计合理。对试制的摩擦摆支座进行本体试验，试验过程如图 3 所示，得到其滞回曲线如图 4 所示。从摩擦摆支座滞回曲线可以看出，对比有无剪力销结构的滞回曲线，除起始力外，其他位置重复性较好，验证了支座性能满足设计要求。

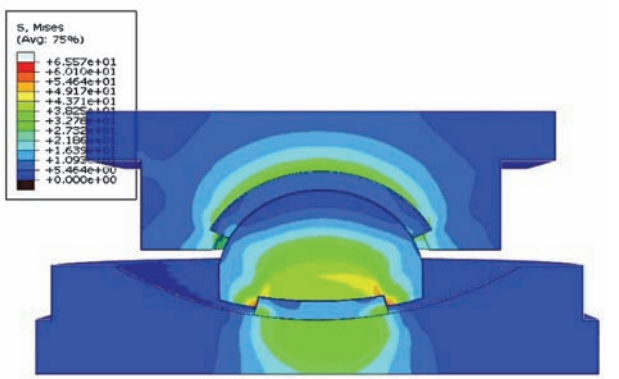


图 2　摩擦摆支座 FEA 应力云图

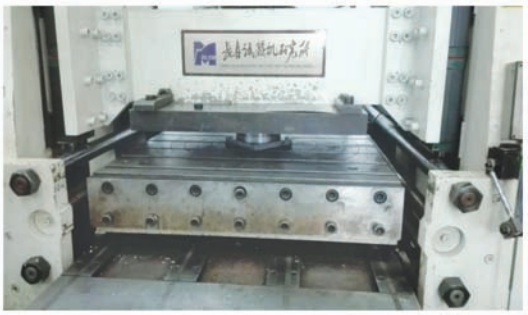


图 3　摩擦摆支座试验图

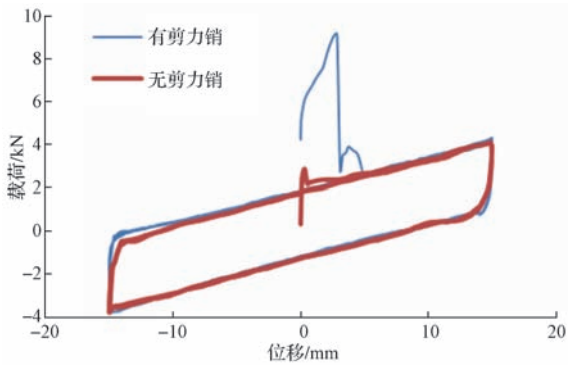
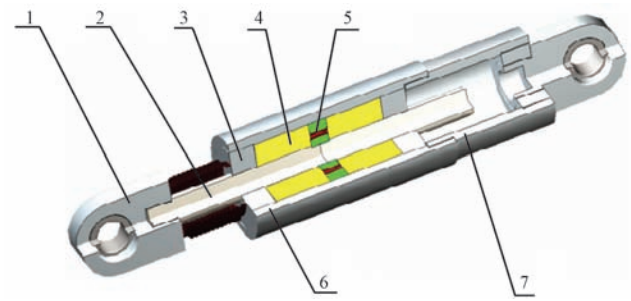


图 4　摩擦摆支座滞回曲线

1.2　粘滞阻尼器的设计和验证

根据振动台试验设计情况，粘滞阻尼器采用先进的流体力学理论计算方法[12]，运用 Star-CCM+ 软件进行仿真分析，确定关键的结构参数，从而准确地实现阻尼参数（阻尼力、阻尼系数、速度指数等）。此外，采用自膨胀、高强度、低摩擦系数的密封系统，利于粘滞阻尼器无论是在零压力还是在超高压力下，自始至终都保持良好的密封性，经受严苛工况的考验。设计的粘滞阻尼器由连接耳环、端盖、活塞杆、活塞、缸体、连接筒、粘性介质等组成，粘滞阻尼器结构示意图如图 5 所示。



1—连接耳环；2—活塞杆；3—端盖；4—粘性介质；5—活塞；6—缸体；7—连接筒

图 5　粘滞阻尼器结构示意图

该粘滞阻尼器采用小孔射流阻尼结构，具有以下特点：

①性能非常稳定，输出力只与速度相关，在不同的振动频率、振幅、环境温度下输出力几乎无变化。

②滞回曲线饱满，耗能能力强大，减震效果突出。

③内部不含阀门及其他易损件，可靠性高，可反复承受巨大冲击载荷。

采用 Star-CCM+ 流体仿真平台对粘滞阻尼器进行数值模拟分析，得到如图 6 所示的粘滞阻尼器 FEA 应力云图。仿真结果验证了粘滞阻尼器的结构设计满足要求。对试制的粘滞阻尼器进行本体试验，试验过程如图 7 所示，得到其滞回曲线如图 8 所示。从试验得到的滞回曲线可以看出阻尼器性能满足设计要求。

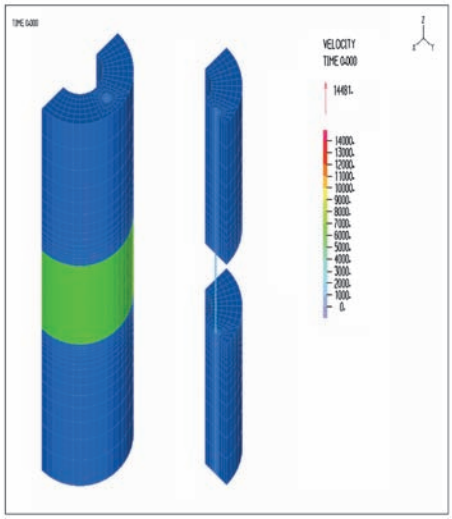


图 6　粘滞阻尼器 FEA 应力云图



图 7　粘滞阻尼器试验图

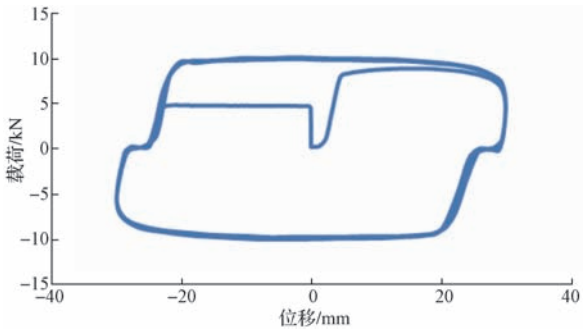


图 8　粘滞阻尼器滞回曲线

2　振动台试验设计

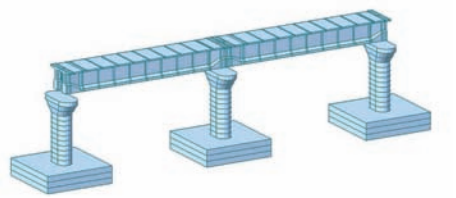
为了验证摩擦摆支座以及粘滞阻尼器在实际工况中的作用，设计了两跨桥梁的振动试验台并进行振动

试验。振动台试验在长沙高速铁路建造技术国家工程实验室进行，选择单线高铁中墩、低墩两跨桥梁原型，如表 1 所示。

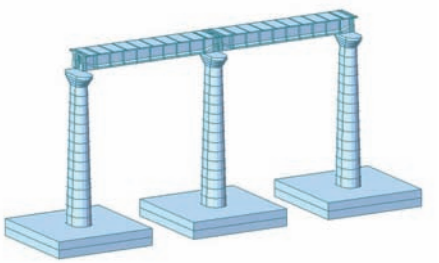
表 1　两跨桥梁原型选择

墩高类型	参数	参数值
低墩	跨数	2(32 m 跨)
	墩高	8 m
中墩	跨数	2(32 m 跨)
	墩高	25 m

建立试验模型与实际尺寸之比为 1:7 的试验模型，如图 9 所示。分别在中墩、低墩上安装摩擦摆支座、粘滞阻尼器 + 普通球型支座和普通球型支座，分别组成摩擦摆支座体系、粘滞阻尼器体系和普通球型支座体系进行振动台试验，共 6 组试验。每组试验近场地震波选择 3 条实际记录地震波：汶川波、Kobe(日本阪神地震)、Northridge(美国北岭地震)，按照烈度为 7、8、9 度对其加速度时程进行比例放大缩小处理。选取地震波的加载方向有：顺桥向、横桥向、顺桥向 + 竖向双向、横桥向 + 竖向双向、顺桥向 + 横桥向 + 竖向三向等。其中普通球型支座体系代表不采用减隔震技术的方案，作为采用摩擦摆支座与粘滞阻尼器体系减隔震效能的对比参照。最终试验模型呈现出的力学与状态特征差异表现为 2 种典型减隔震装置的减隔震效能。



（a）矮墩模型



（b）中墩模型

图 9　高铁桥梁模型

3　振动台试验特征状况与关键试验数据分析

3.1　振动台试验特征状况描述

单线高铁桥梁缩尺模型的振动台试验如图 10 所示。输入地震波激励后，观察各组桥梁模型的状况，发现 3 种支座体系的试验特征状况相差较大，主要特征状况描述见表 2。

此外在模型墩上观察和试验后拆解查看，摩擦摆支座除剪力销外无明显损伤，粘滞阻尼器无漏液及可见损伤。



（a）摩擦摆支座振动台试验



（b）粘滞阻尼器体系振动台试验

图 10　单线高铁桥梁缩尺模型的振动台试验

表 2　桥梁模型试验过程状况描述

支座体系	烈度	现象
摩擦摆支座体系 粘滞阻尼器体系 普通球型支座体系	7 度	模型墩未出现肉眼可见裂缝，结构完好，初步进入弹塑性阶段。相对位移接近
摩擦摆支座体系	8 度	支座挡圈剪力销按预期剪断，模型墩上未出现明显裂缝。相对位移较大
粘滞阻尼器体系	8 度	8 m 墩模型墩底混凝土出现细微拉裂缝，纵筋没有屈服，桥梁主体结构安全。相对位移较小
普通球型支座体系	8 度	模型墩墩底保护层混凝土开始出现裂缝，部分纵筋发生屈服。相对位移中等
摩擦摆支座体系	8.5 度，9 度	模型墩表面出现少许保护层混凝土剥落，但无明显裂缝出现，纵筋没有屈服。相对位移最大
粘滞阻尼器体系	8.5 度，9 度	25 m 墩模型表面出现少许保护层混凝土剥落，但无明显裂缝出现，纵筋没有屈服。相对位移较小
普通球型支座体系	8.5 度，9 度	墩底出现一圈明显的环状裂缝，且 8 m 墩模型的裂缝更严重，基本丧失水平承载能力，25 m 墩模型纵筋接近屈服，处于轻微、中等损伤水平

3.2　振动台试验关键数据分析

传感器采集的振动台试验数据很多，为简便起见，这里仅对墩底保护层混凝土顺桥向地震响应数据进行量化分析。按常规取墩底混凝土压应变减震率为

$$\phi_{c,\varepsilon}=\frac{\varepsilon_{c,\max}-\varepsilon'_{c,\max}}{\varepsilon_{c,\max}}\times 100\%$$

式中：$\varepsilon_{c,\max}$ 为普通球型支座体系墩底保护层混凝土最大压应变；$\varepsilon'_{c,\max}$ 为摩擦摆支座或粘滞阻尼器体系墩底

保护层混凝土最大压应变。

墩底保护层混凝土压应变减震率越大，说明减震效能越好。

试验数据显示，墩底混凝土顺桥向减震率，对于 8 m 墩模型，摩擦摆支座体系减震率为 44%~88%，粘滞阻尼器体系减震率为 8%~51%；对于 25 m 墩模型，摩擦摆支座体系减震率为 13%~72%，粘滞阻尼器体系减震率为 48%~94%。这说明摩擦摆支座和粘滞阻尼器体系相对普通球型支座体系都具有明显的减隔震作用。

4 结论

①对高铁桥梁结构，采用摩擦摆支座和粘滞阻尼器 + 普通球型支座相对普通球型支座，都具有非常不错的减隔震效能，采用摩擦摆支座和粘滞阻尼器的铁路桥梁的可靠性和安全性相比采用普通球型支座可显著提高。

②因 8 m 墩模型墩身粗短，桥梁结构自振周期短，摩擦摆支座体现了更好的减隔震效能。25 m 墩模型由于墩身较柔，周期偏长，地震响应较小，粘滞阻尼器体系减震效果更加明显。这说明主要表现为隔震效能的摩擦摆支座更适用于低墩刚性结构，而主要表现为减震效能的粘滞阻尼体系更适应于高墩柔性结构。

③摩擦摆支座剪力销通过合理的设计，在本次振动台试验中按预期剪断。如果剪力销设置不合理，在达到或超过设计水平力时不能剪断，则摩擦摆支座和普通球型支座的作用相同，丧失减隔震功能，因而摩擦摆支座剪力销的设计非常关键。在设计剪力销时，应保证受力简单明确，采用极限强度设计，并且选择合适的材料保证其抗屈服与抗疲劳性能。粘滞阻尼器在试验中减震效果良好，说明采用的先进的流体力学理论计算方法，保证了阻尼参数的准确；同时采用的自膨胀、高强度、低摩擦系数的密封系统，始终保持了良好的密封性，经受住了严苛工况的考验，这些方法都值得推广借鉴。

参考文献：

[1] 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.

[2] California Department of Transportation. Seismic Design Criteria [S]. Version 1•1. Sacramento：California Department of Transportation, 1999.

[3] AASHTO. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications [S]. 4th ed. Washington, D C： American Association of State Highway and Transportation Officials, 2007.

[4] European Committee for Standardization. Eurocode 8 Design of Structures for Earthquake Resistance-Part 2：Bridges [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.

[5] Japan Road Association. Specifications for Highway Bridges, PartV：Seismic Design [S]. Tokyo：Maruzen Publishing Co., Ltd., 2002.

[6] Transit New Zealand. Bridge Manual Plus Amendment No•1 [S]. Wellington: Transit New Zealand, 1995.

[7] Improved Seismic Design Criteria for California Bridges：Provisional Recommendations：ATC-32 [S]. Redwood City：Applied Technology Council, 1996.

[8] International Organization for Standardization. Basis of Structural Design-Seismic Action on Structures：ISO 3010—2001 [S]. Geneva：ISO Central Secretariat, 2001.

[9] 穆祥纯 . 论中外城市桥梁减、隔震的技术创新 [J]. 城市道桥与防洪，2016（8）：60–64.

[10] 冷新云，夏俊勇，郭红峰，等. 摩擦摆支座结构设计及验证[J]. 铁道建筑，2013（5）：45–48.

[11] Xia Junyong，Ning Xiangliang，Tan Ping, et al. Impact of the equivalent center of mass separating from the sliding surface on the isolation performance of friction pendulum bearings [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration，2015，14(4)：695–702.

[12] 唐璐，文登，郭强，等. 基于试验数据的粘滞阻尼器孔缩力修正公式 [J]. 机械设计与研究，2015，31(2)：143–146.

[13] 中华人民共和国交通运输部 . 桥梁用粘滞流体阻尼器：JT/T 926—2014 [S]. 北京：人民交通出版社，2014.

[14] 刘军，宁响亮，李文斌，等. 弹塑性钢阻尼元件在桥梁减震中的应用 [J]. 铁道建筑，2012(2)：22–24.

[15] 刘军，律伟，张小锋，等 . ε 型钢阻尼器滞回疲劳性能分析及试验 [J]. 铁道建筑，2016(9)：31–34.

[16] 刘彦辉，谭平，周福霖，等. 高墩隔震连续梁桥地震模拟振动台试验 [J]. 中国公路学报，2015，28(2)：60–68.

[17] 温佳年，李洪营，韩强，等. 滑动摩擦隔震桥梁振动台试验研究 [J]. 地震工程与工程振动，2016，36(2)：102–110.

[18] 王雷，徐艳 . 榕江大桥主桥振动台试验研究 [J]. 世界地震工程，2015，31(3)：39–45.

[19] 王曙光，刘伟庆，徐秀丽，等 . 大跨连续梁桥纵向消能减震振动台模型试验 [J]. 中国公路学报，2009，22(5)：54–59.

作者简介：宁响亮（1980–），男，博士，高级工程师，主要从事结构减隔震研究。