

# 高速铁路大跨连续梁桥减隔震方案讨论<sup>\*</sup>

冯亚成

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 针对某铁路大跨连续梁桥, 基于3种减隔震装置, 提出了4种减隔震设计方案, 利用非线性时程分析法对每种方案进行了计算分析。结果表明, 液体粘滞阻尼器可有效改善桥梁纵向的受力和位移; 双曲面球型减隔震支座能同时改善桥梁纵、横向的受力, 但位移较大; 液体阻尼器与双曲面减隔震支座配合使用可同时改善结构的纵、横受力, 并且可控制位移; 铅芯阻尼器耗能效果显著, 位移基本可控, 应继续开展研究。

**关键词:** 高速铁路; 大跨连续梁桥; 减隔震支座; 阻尼器

中图分类号: U442.5<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2015)01-0167-07

## 0 引言

近年来世界范围内地震频发, 强震对结构物造成了严重的损坏(王克海, 2007; 叶爱君, 2011; 夏修身, 陈兴冲, 2011)。桥梁作为生命线工程, 其抗震设计受到越来越多的重视。相对普速铁路桥梁, 高速铁路桥梁行车要求具有更高的平顺性和稳定性(郑健, 2008), 因此对结构基础的刚度要求更大, 而桥梁的良好抗震性能则要求结构具有较大的柔度。在一些高烈度区, 常规跨度的简支梁桥, 仍可通过增加桥墩及桩基截面尺寸或增强配筋的做法来达到抗震设防的目的, 并且将工程造价控制在可接受的范围内。但对于大跨结构如连续梁等, 本身上部结构质量很大, 按照传统的受力模式, 地震时产生的水平惯性力几乎全部由制动墩承担, 制动墩受力过大致使下部基础数量庞大, 工程造价成倍增加, 且由于基础增大, 结构刚度会增大, 地震力亦会进一步增大, 从而使抗震设计陷入恶性循环。因此行车要求的大刚度与地震要求的良好柔度之间的矛盾, 在客运专线等高速铁路桥梁设计中尤为突出。

近年来减隔震的设计理念逐渐被引入到大跨桥梁的抗震设计中(范立础, 王志强, 2001), 由于采用减隔震装置延长结构的周期或增加结构的阻尼(彭天波等, 2007), 将地面输入到结构中的

能量进行耗散或将结构与可能引起的地面运动分离, 减少了梁部传递给墩台及基础的地震力, 大大减小了地震时桥梁结构的响应(刘书贤等, 2014), 使得设计更为经济合理, 结构安全性能更高, 得到越来越多工程师的推崇。

本文结合铁路桥梁自身特点, 介绍了3种常用的减隔震技术, 并以某客运专线铁路一联(80+2×128+80)m连续梁的减隔震设计为例, 计算分析了采用4种不同减隔震方案时结构的内力和位移响应, 针对计算结果对4种减隔震方案的优缺点进行了评价, 为铁路大跨连续梁桥的减隔震设计和分析提供参考。

## 1 减隔震技术及方案

目前, 桥梁工程中使用的减隔震技术主要分为两类: 一是采用阻尼器增加结构的阻尼来耗散能量, 以减小结构的位移并提高桥墩的抗震性能; 二是采用减隔震支座延长结构周期, 从而减小地震反应。结合铁路桥梁的特点, 将3种可用于铁路桥梁减隔震装置的特点和应用介绍如下。

### 1.1 液体黏滞阻尼器

液体粘滞阻尼器是一种类似车辆减震器的活塞筒状装置, 其装置内填硅油, 在活塞的往复运动中液体硅油起粘滞作用, 耗散地震能量, 对结构起到耗能、减震控制作用(陈永祁, 2012)。这

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2014-08-30.

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2013G002-B)和中铁第一勘察设计院集团有限公司科研项目(12-25)联合资助.

种内置硅油的速度型阻尼器,性能相对可靠稳定,并已经发展成从规范、设计规程到分析计算程序、产品检验的完整体系 (UNI EN 15129—2009)。

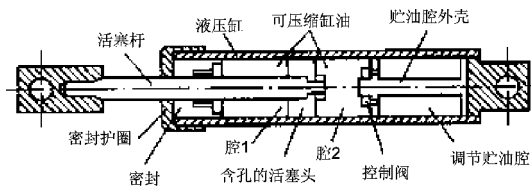


图 1 粘滞阻尼器构造示意图

Fig. 1 Schematic chart of liquid viscous damper conformation

粘滞阻尼器一般由活塞、油缸及节流孔组成,是利用活塞前后压力使油流过节流孔产生阻尼力的一种减震装置。目前常用的基于 Maxwell 模型粘滞阻尼器的力学特性一般关系可表达为

$$F = CV^\alpha. \quad (1)$$

式中,  $F$  为阻尼力;  $C$  为阻尼系数;  $V$  为阻尼器冲程速度;  $\alpha$  为阻尼指数,其值范围在 0.1 ~ 2.0,从抗震角度看,常用值一般在 0.2 ~ 1.0。

液体粘滞阻尼器自发明以来,经历了几次技术革新,目前已较为成熟,满足工程需要的各种不同参数的阻尼器在国内外的重点桥梁工程中发挥着重要作用 (表 1)。

表 1 阻尼器在国内外应用的部分实例

Tab. 1 Parts of application examples of liquid viscous damper at home and abroad

项目	最大阻尼力 /kN	最大冲程 /mm	桥梁类型
江苏江阴长江大桥	1 000	±1 000	双塔悬索桥主跨 1 385 m
舟山西喉门大桥	1 000	±1 100	双塔悬索桥主跨 1 650 m
重庆鱼嘴长江大桥	1 500	±550	双塔悬索桥主跨 616 m
乌锡黄河铁路特大桥	2 000	±450	7 孔 108 m 连续梁
杭州江东大桥	2 000	±300	双塔自锚式悬索桥主跨 260 m
美国 Richmond 桥	1 000	±965	悬索桥
Maysville 斜拉桥	1 300	±305	斜拉桥

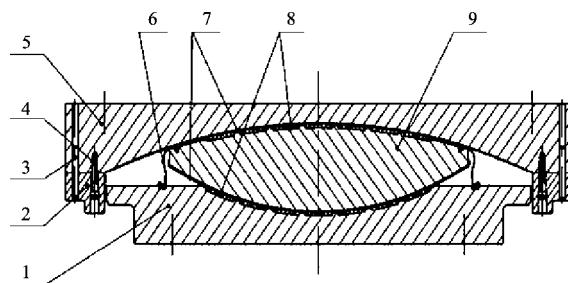
粘滞阻尼器产生的阻尼力与速度和温度有关,在应用这类阻尼器时应予以注意。此外,油压的调整、漏油、灰尘的侵入等也需采取相应的措施,并进行必要的维护。由于粘滞阻尼器具有方向性,

在其安装设置时需考虑,而且制作加工精度要求高,较大体积的粘滞阻尼器制作、安装较为困难。

## 1.2 双曲面减隔震支座

双曲面球型减隔震支座是在球型支座基础上,用大半径球面摩擦副代替平面摩擦副,并设置抗剪装置而形成的一种新型支座 (图 2),彭天波等 (2007) 对其进行了深入的理论分析和试验研究。双曲面球型减隔震支座的减隔震原理与 FPS 减隔震支座相同 (焦驰宇等, 2007),均为摩擦钟摆原理。双曲面球型减隔震支座在地震不发生的情况下,其功能与普通球型支座一致,可满足桥梁的正常运行。

当地震发生且水平横向力超过预定值时,限位装置的抗剪销和安全螺钉被剪断,支座的横向限位约束被解除,大半径球面摩擦副横向即可自由滑动,其平面尺寸主要由最大设计位移控制。该支座利用简单的钟摆机理延长了桥梁的自振周期,从而降低加速度反应;地震过后,结构自重又可形成恢复力,帮助桥梁上部结构回到原来的位置。通过调整支座转动半径可得到不同的减震效果,增加支座转动半径,减震效果增强,但同时也会增大支座的水平位移。



1: 下支座板; 2: 导向板; 3: 抗剪销; 4: 安全螺钉;  
5: 上座板; 6: 防尘密封装置; 7: 球面不锈  
钢滑板; 8: 四氟乙烯板; 9: 中座板

图 2 双曲面球型减隔震支座构造

Fig. 2 Conformation chart of double spherical aseismic bearing

双曲面球型减隔震支座系列产品已经在苏通长江大桥、上海崇明越江通道长江大桥、福厦铁路乌龙江特大桥、佛山平胜大桥、荆岳长江大桥等大型桥梁工程中投入应用。

## 1.3 铅芯阻尼器

铅芯阻尼器充分利用铅具有密度大、熔点低、塑性高、强度低、润滑能力强等特点,同时由于

铅具有较高的延性和柔性,在变形过程中可以吸收大量的能量,并且具有较强的变形跟踪能力,通过动态恢复和再结晶过程,其组织和性能还可恢复至变形前的状态(周云等,1999)。因此铅芯阻尼器具有以下优点:(1)使用寿命不受限制;(2)提供的阻尼力可靠;(3)对位移变化敏感;(4)构造简单,工作中不需维护。但它具有恢复性差和易对环境造成污染等缺点。

中铁第一勘察设计院集团有限公司减隔震攻关小组利用“支座功能分离”的设计理念,已成功开发了简支梁上使用的减震樨装置(李承根,高日,2009)。在此基础上,沿用“支座功能分离”的设计理念,采用球型钢支座提供竖向支撑,将铅芯橡胶支座改造成为叠层钢环内装铅芯的构造装置,此装置水平向利用钢环的水平间隙发生大的变形来满足地震时的位移需要,同时装置内的铅芯发生重结晶耗散地震能量。初步的试验结论表明该装置具有较大的耗能能力。

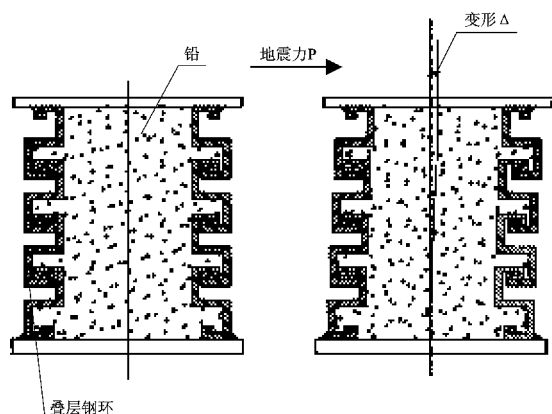


图3 铅芯阻尼构造及变形示意图

Fig. 3 Schematic diagram of structure and transmogrification of lead core damper

#### 1.4 4种减隔震方案

根据几种减隔震装置的特点介绍,结合 $(80+2\times 128+80)$  m连续梁桥的结构构造、受力和场地特点,制定了4种减隔震方案:(1)纵向设置粘滞阻尼器;(2)采用双曲面球型减隔震支座;(3)纵向设置粘滞阻尼器+双曲面支座方案;(4)铅芯阻尼器方案。在优化各方案减隔震装置参数的基础上,分别采用4种方案对该铁路连续梁桥进行动力仿真模拟,提取计算结果对各方案进行综合评价分析。

## 2 动力计算模型

### 2.1 分析模型

本文以某高速铁路一联 $(80+2\times 128+80)$  m连续梁为例,桥址位于地震动峰值加速度 $0.3\text{ g}$ 的高烈度地震区,场地特征周期 $T_g=0.55\text{ s}$ ,上部结构梁体重达 $28\,000\text{ t}$ 。该桥具有跨度大、上部结构质量重、场地地震烈度高3个明显特点。全桥采用三维空间梁单元模型,阻尼器采用基于Maxwell模型的滞后系统进行模拟,双曲面减隔震支座采用摩擦摆及间隙和钩单元模拟,有限元模型如图4所示。

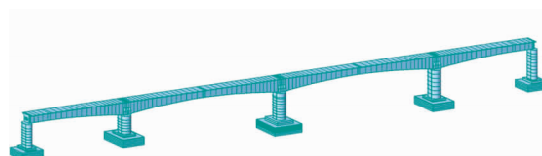


图4  $(80+2\times 128+80)$  m全桥梁有限元模型

Fig. 4 The FEA model of  $(80+2\times 128+80)$  m

### 2.2 地震动输入

根据场地安评报告提供的3条罕遇地震下的人工地震波,50年超越概率2%的最大地震动峰值加速度达 $0.6\text{ g}$ ,将地震波输入到计算模型中,采用时程分析法计算结构在各种减隔震方案下的响应(图5)。

## 3 4种方案分析比较

将上述4种减隔震方案的计算结果按照纵桥向和横桥向分别进行对比分析,评价各种方案对墩身内力及结构位移的减隔震效果。

### 3.1 纵桥向地震响应

针对墩顶的纵向水平力、墩底弯矩进行对比分析,对比结果见图6、7。

由图6a可以看出,就各墩墩顶水平力的大小和分布而言,采用方案2即采用双曲面球型减隔震方案效果最佳,不仅各墩的水平力分配较为均匀,而且各墩墩顶水平力也是这4种方案中相对最小的;方案1与方案3两种方案的效果基本相当;方案4采用铅芯阻尼的效果的位于方案2与方案1、3之间。从减震的效果来看,4种方案的减震效果均较为理想,均可以将次主墩、主墩的墩顶纵向水平力

控制在 23 000 kN 以内, 可将过渡墩的墩顶纵向水平力控制在 13 000 kN 内。由图 6b 可以看出, 除 1 号墩的弯矩比其它几种方案大外, 方案 2 其余桥墩纵向弯矩均比其余方案小。4 号墩几种方案的弯矩均比较接近, 相差最大的为 2、3 号墩, 采用阻尼器 +

双曲面的方案时, 2、3 号墩墩底弯矩比单独采用阻尼器或单独采用双曲面支座的都大, 说明结构设计中减隔震措施要设置适当。一个结构中同一部位的减隔震措施并不是越多越好, 还涉及到各减隔震措施之间能否协同工作, 需慎重考虑。

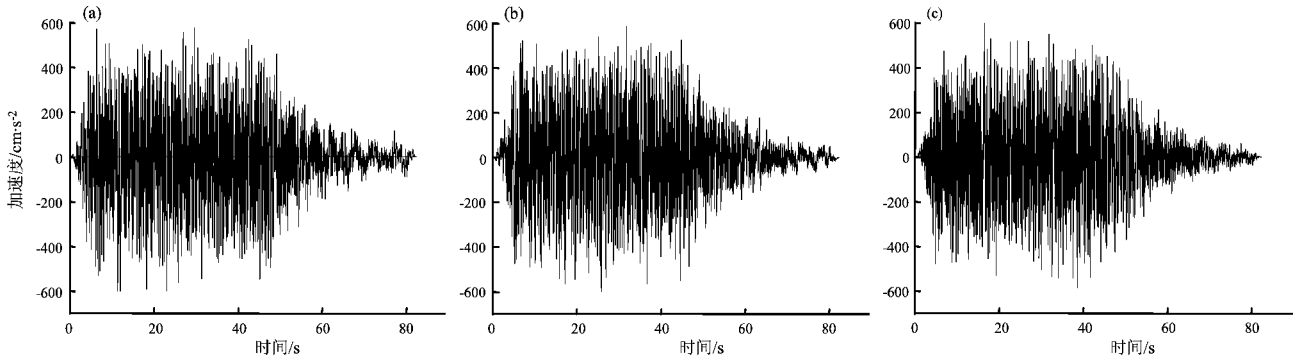


图 5 50 年超越概率为 2% (罕遇地震) 的 3 条人工波

(a) 罕遇地震时程样本 1; (b) 罕遇地震时程样本 2; (c) 罕遇地震时程样本 3

Fig. 5 Three artificial waves of 2% of the 50 years transcendental probability

(a) rare earthquake time history of swatch 1; (b) rare earthquake time history of swatch 2;

(c) rare earthquake time history of swatch 3

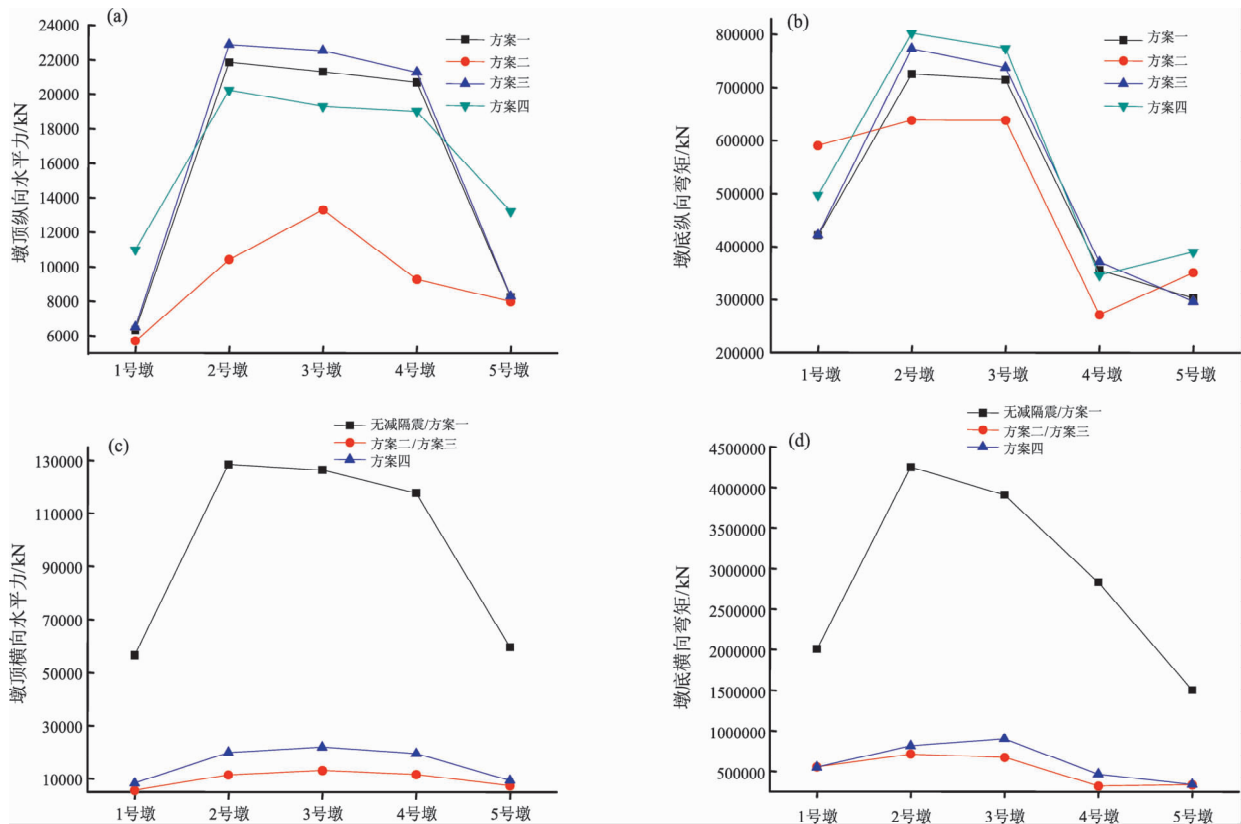


图 6 4 种减隔震方案对比分析结果

(a) 各桥墩墩顶纵向水平力对比; (b) 各桥墩墩底纵向弯矩对比; (c) 各桥墩墩顶

横向水平力对比; (d) 各桥墩墩底横向弯矩对比

Fig. 6 Comparison and analyze result of 4 kinds of seismic mitigation and isolation schemes

(a) comparison of longitudinal force of the top of pier; (b) comparison of longitudinal bending moment of the bottom of pier;

(c) comparison of lateral force of the top of pier; (d) comparison of lateral bending moment of the bottom of pier

3.2 横桥向地震响应

图 6c 给出了不同方案下桥墩墩顶横向水平力的对比，由于方案 1 仅在纵桥向设置阻尼器，因此横桥向的墩顶水平力与未采用减隔震方案的相同。可以看出由于采用了双曲面球型减隔震支座，延长了结构周期，方案 2 和方案 3 实施后墩顶横向水平力得到很大幅度的降低，方案 4 由于铅芯的高耗能能力，也使墩顶水平力降低很大；且采用方案 2、3、4 后，各墩横向受力较未采用减隔震方案前更为均匀。图 6d 得到的墩底横桥向弯矩图与图 8 的变化趋势一致。

3.3 结构位移响应

图 7 给出了 4 种方案下和未采用减隔震方案前  $(80+2\times 128+80)$  m 连续梁顺桥向、横桥向位移的对比图。分析时考虑到结构构造及梁缝的设置，认为纵向位移宜控制在 30 cm 以内，否则可能使梁体发生碰撞损伤或相邻孔发生落梁危害。由图 7 可以清楚看到，无减隔震方案下，纵横向位移均较小，但桥墩和基础受力最大，桥墩可能发生倒塌破坏；采用方案 1 纵向位移可以得到保证，横向位移较小的原因是由于横向约束未放开的缘故，是以桥墩横向承受很大地震力为代价的；采用方案 2 即双曲面支座，周期延长，地震力减小，支座发生大位移，纵、横向位移均较大，无法保证结构的合理性；方案 3 在双曲面支座基础上纵向设置阻尼器，控制了纵向位移，但横向位移仍过大；方案 4 采用铅芯阻尼的方案对

纵、横向位移控制相比其他方案是 4 种方案中最好的。

通过上面数据和图表的对比分析，将各方案对大跨连续梁桥减隔震的控制效果列表如下，综合考虑各种因素，在  $(80+2\times 128+80)$  m 连续梁的抗震设计中，方案 3 减隔震原理明确，实施效果好，且该方案减隔震装置性能稳定，可针对方案 3 横向位移过大的问题继续开展研究，采用适当构造措施如使用防落梁装置限制横向位移或调整阻尼器设置角度来解决，建议将方案 3 作为该桥减隔震设计的推荐方案。

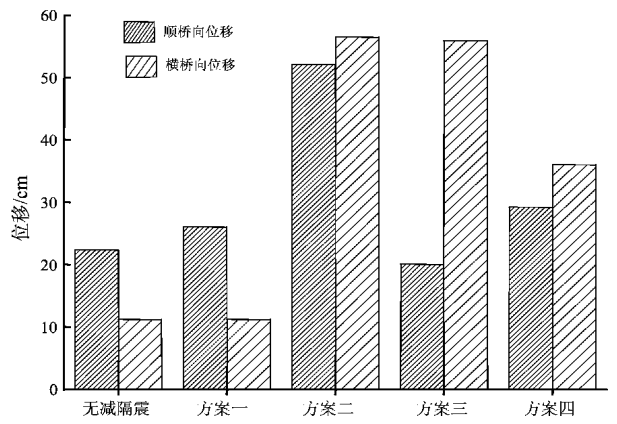


图 7 4 种不同方案下  $(80+2\times 128+80)$  m 连续梁位移对比图  
Fig. 7 Comparison chart of  $(80+2\times 128+80)$  m continuous girder displacement of four different schemes

表 2 不同方案下减震效果的比较

Tab. 2 Comparison of seismic mitigation effects for different schemes

方案	采取措施	工作原理及内力控制	位移控制	实施条件	存在问题	结论
方案 1	纵向加液体粘滞阻尼器	增加结构阻尼，有效降低梁部传给桥墩的纵向水平力	可有效控制纵向位移	产品较为成熟，工作性能基本稳定	横向抗震没法解决	
方案 2	采用双曲面减隔震支座	延长结构周期，同时降低桥墩纵横向水平力	纵横向位移均较大，可自恢复	性能稳定	纵、横向位移量均过大	
方案 3	双曲面减隔震支座+纵向设置阻尼器	延长结构周期，增加结构阻尼，降低桥墩纵横向水平力	可控制纵向位移，横向位移较大，可自恢复	性能稳定	横向位移过大	☆推荐
方案 4	支座功能分离，采用铅芯阻尼器	增加结构阻尼，可同时降低桥墩纵横向水平力	纵横向位移基本均可控	正处于试验阶段	未投入实桥应用	

4 结论

针对高烈度地震区客运专线等高速铁路大跨连续梁桥的抗震设防遇到的设计难题，采用减隔震设

计思想，将液体粘滞阻尼器、双曲面球型减隔震支座及铅芯阻尼器等方法综合运用于某高速铁路大跨连续梁桥中，通过计算分析得出以下主要结论：

(1) 桥梁主梁与墩台之间设置液体粘滞阻尼器，可以有效的减小纵桥向的地震响应，控制纵

桥向梁体位移;也可在设计时结合墩顶与梁体的空间位置,纵横两个方向一起设置阻尼器同时改善桥梁两个方向的受力。

(2) 双曲面球型减隔震支座具有性能稳定、位移可自恢复等优点,且能同时改善桥梁两个方向的受力,在高烈度地震区大跨桥梁的减隔震设计中有广阔的应用前景,但同时存在位移过大的问题,应采取相应措施予以解决,如可通过纵桥向加阻尼器、横桥向设防落梁等措施限制位移。

(3) 铅芯阻尼器充分发挥了铅的高耗能和重结晶的特性,具有很大的耗能能力,发展潜力巨大,但目前正处于试验阶段,可继续深化研究。

#### 参考文献:

陈永祁. 2012. 桥梁工程液体黏滞阻尼器设计与施工[M]. 北京:中国铁道出版社.

范立础,王志强. 2001. 桥梁减隔震设计[M]. 北京:人民交通出版社.

焦驰宇,胡世德,管仲国. 2007. FPS 抗震支座分析模型的比较研究[J]. 振动与冲击,26(10):113-117.

李承根,高日. 2009. 高速铁路桥梁减震技术研究[J]. 中国工程科学,11(2):81-86.

刘书贤,魏晓刚,张弛,等. 2014. 基于隔震技术的桥梁结构抗采动变形抗地震保护[J]. 地震研究,37(1):86-93.

彭天波,李建成,范立础. 2007. 双曲面球型减隔震支座的开发及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版),35(2):176-180.

王克海. 2007. 桥梁抗震研究[M]. 北京:中国铁道出版社.

夏修身,陈兴冲. 2011. 桥梁震害分析及合理抗震体系研究[J]. 工程抗震及加固改造,33(6):132-136.

叶爱君. 2011. 桥梁抗震[M]. 北京:人民交通出版社.

郑健. 2008. 中国高速铁路桥梁[M]. 北京:高等教育出版社.

周云,周福霖,邓雪松. 1999. 铅阻尼的应用和研究[J]. 世界地震工程,15(1):53-61.

UNI EN 15129—2009, Anti-seismic devices[S].

## Discussion on Seismic Mitigation and Isolation Schemes for High-speed Railway Large-span Continuous Girder Bridges

FENG Ya-cheng

(China Railway First Survey & Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shannxi, China)

### Abstract

For a railway large span continuous girder bridge, basing on three types of isolation devices, we give four kinds of seismic mitigation and isolation schemes, and calculate and analyze each scheme by using nonlinear time history analysis method. The results show that the liquid viscous dampers could improve the longitudinal mechanics and displacement performances of the bridge, and the double spherical aseismic bearing could ameliorate the longitudinal and transverse mechanics behaviors of the bridge at the same time, but leads to the large displacement. If the liquid viscous dampers are used in conjunction with double spherical aseismic bearing, the longitudinal and transverse mechanics behaviors could be improved and the displacement performance could be under control. The ability of lead damper for dissipation and absorbing earthquake energy is outstanding, and the displacements could be under control, so it needs more studies.

**Key words:** high speed railway; seismic mitigation and isolation; aseismic bearing; damper