

文章编号: 1001-4632 (2014) 06-0034-07

近断层地震动下的高速铁路桥梁减震设计

石岩^{1,2}, 王东升^{1,2}, 孙治国^{1,2}

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁 大连 116026;
2. 辽宁省公路工程重点实验室, 辽宁 大连 116026)

摘要: 在“功能分离”设计理念基础上, 提出减震棒与拉索限位器组合的高速铁路桥梁减震方案, 通过减震棒的屈服耗能作用减小桥梁的地震响应, 通过拉索限位器控制减震棒的过大变形和防落梁, 给出减震棒和拉索限位器在多遇地震、设计地震和罕遇地震下的设计准则和设计方法。以1座高速铁路连续梁桥为例, 研究在具有向前方向性效应、滑冲效应和无速度脉冲效应的近断层地震动下, 采用组合减震方案桥梁结构的抗震性能。结果表明: 仅采用减震棒的桥梁在速度脉冲型近断层地震作用下可能因减震棒变形过大而不安全; 加设拉索限位器后, 能有效地控制减震棒的变形及墩梁的相对位移, 起到了较好减震效果, 其减震率在60%以上。

关键词: 桥梁; 近断层地震动; 减震设计; 减震棒; 拉索限位器; 高速铁路

中图分类号: U442.5

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2014.06.00

我国高速铁路运行里程和建设规模已居世界前列, 目前正逐步向西部省份延伸。我国西部山区新构造活动强烈且断层与断裂带发育广泛, 部分活动断层可绵延数百乃至上千公里, 具有较高的地震危险性。高速铁路线上桥梁占相当大的比重, 在西部其临近或穿越活动断层将不可避免, 同时还可能存在未探明的隐伏活动断层的影响, 抗震问题突出。1999年建设的台湾高速铁路遭遇了集集地震, 随即台湾交通部修订了相关规范并提高了桥梁抗震设计标准, 设计地震动考虑了具有速度脉冲效应的近断层地震动。目前我国高速铁路桥梁抗震设计仍主要依据《铁路工程抗震设计规范》。该规范在2009年进行局部修订时才将高速铁路桥梁抗震纳入, 尚缺少对近断层地震动的特殊考虑。

桥梁减隔震技术通过合适装置延长桥梁的结构周期和(或)消耗地震能量实现降低桥梁地震响应的目的。据统计, 至上世纪末已有上百座减隔震桥梁建成, 多为采用铅芯橡胶支座和高阻尼橡胶支座的公路桥梁。部分临近发震断层的桥梁也经受了地震考验, 如土耳其的Bolu高架桥^[1]、冰岛的Thjorsa River桥^[2]和Oseyrar桥^[3], 尽管它们遭受了一定程度的地震破坏, 但在具有速度脉冲效应的

近断层地震动作用下仍具有较好的减震效果, 若不采用减震设计可能情况更为糟糕。

由于橡胶类隔震支座的横向刚度较低, 而高速铁路桥梁上部结构自重较大, 且对支座及梁体的横向位移要求相对严格, 故橡胶支座很难用于高速铁路桥梁的隔震, 尚有诸多问题需要进一步研究^[4-6]。日本高速铁路发展较早且日本地震频发, 其桥梁抗震设计方法值得借鉴, 特别是支座和限位系统“功能分离”的设计理念。该设计理念认为地震时支座受力复杂, 易于损坏, 故要求支座仅满足正常使用下竖向承载及适应梁体水平、转动位移, 而地震下梁体水平位移由限位系统承受, 包括各类钢制剪力键、冲击锁定装置等。台湾高速铁路桥梁中也采用了“支座+限位剪力键”的支承体系^[7]。目前“功能分离”的支座设计理念已初步被我国高速铁路设计人员接受, 认为是提高桥梁抗震能力及实现减(隔)震的重要方法^[8-10]。本文借鉴李承根等提出的钢棒式减震棒装置, 针对高速铁路桥梁在近断层地震动下的高抗震需求问题, 提出由减震棒与拉索限位器构成组合减震系统, 利用减震棒的屈服隔震和滞回耗能减小桥梁的地震响应, 利用限位器控制减震棒的变形和防止落梁破坏。

收稿日期: 2014-03-10; 修订日期: 2014-09-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178071); 国家“九七三”计划项目(2011CB013605); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-0751); 中央高校基本科研业务费资助项目(3132013315, 3132014073)

作者简介: 石岩(1985—), 男, 甘肃通渭人, 博士研究生。

1 高速铁路桥梁减震系统设计

2009 年版《铁路工程抗震设计规范》已初步给出了铁路桥梁性能抗震设计的框架, 本文以此为基础研究减震棒和拉索限位器组合减震系统的设计准则和方法。

1.1 减震棒装置的设计

李承根等开发的减震棒是一种适合于高速铁路桥梁的减震装置, 其由低屈服点钢制成, 构造简单, 其结构示意图如图 1 所示, 其中区段 A 为变形段, 有效变形长度为 0.85 m, 区段 B 为锚固段。减震棒的锚固段嵌固于桥墩顶部的钢筋混凝土中, 棒顶伸入梁底的预埋装置中, 并采用橡胶或沥青砂浆填塞空隙。使用减震棒时原有的固定支座用活动支座取代, 实现支座功能分离。减震棒在桥梁结构中的构造形式如图 2 所示。

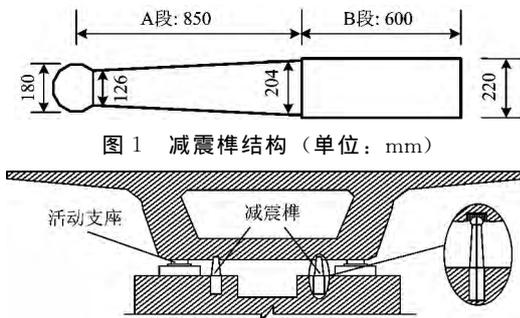


图 1 减震棒结构 (单位: mm)

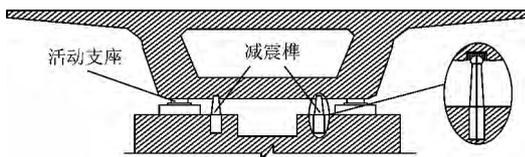


图 2 桥梁结构及减震棒构造

1.1.1 设计准则

依据铁路工程抗震设计规范及文献 [10] 的建议, 采用“三水准”的设计准则和能力设计原理进行减震棒设计。

利用 OpenSees 软件通过对图 1 所示的减震棒结构进行弹塑性分析, 得到图 3 所示单根减震棒的恢复力—位移曲线, 再通过控制减震棒的应变确定其性能状态、得到相关设计参数 (位移和强度)。

(1) 多遇地震作用下减震棒应处于弹性工作状态, 其最大应变控制在 0.3% 以内, 对应的屈服位移为 6 mm, 屈服强度为 325 kN。

(2) 设计地震作用下减震棒允许发生一定的塑性变形, 最大应变值控制在 7% 以内, 对应得到减震棒的设计位移为 30 mm。

(3) 罕遇地震作用下允许减震棒发生较大的塑性变形, 最大应变值控制在 13% 以内, 得到减震棒的极限位移为 72 mm。

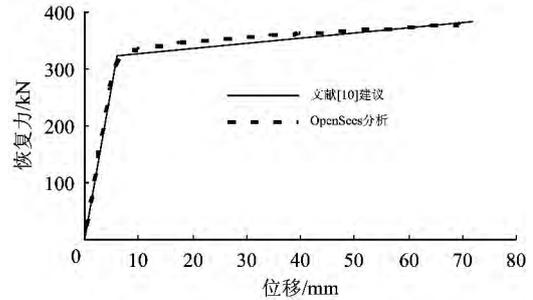


图 3 减震棒的恢复力—位移曲线

铁路桥梁抗震设计通常允许桥墩在设计地震下发生可修复的塑性损伤, 为保证减震棒先于桥墩发生塑性屈服, 要求桥墩的设计屈服强度大于减震棒的实际屈服强度。因高速铁路桥梁较多地采用钢筋混凝土实体墩, 上述要求一般能够满足。

1.1.2 设计方法

1) 正常使用阶段和多遇地震下强度设计

依据“功能分离”的设计理念, 减震棒应承担桥梁正常使用阶段的水平作用力 (列车制动力等) 和控制梁体的水平位移, 因此正常使用阶段减震棒的组合受力应小于其屈服强度, 进而初步确定减震棒的数量。但是, 由于正常使用阶段列车制动力等产生的水平作用力通常较小, 据此确定的减震棒数量可能远不能满足地震需求。因此, 建议以多遇地震阶段验算和确定减震棒的数量, 即不考虑活动支座摩擦力的贡献, 按初步确定的减震棒数量采用减震棒弹性刚度进行反应谱分析, 以验算减震棒的变形; 若减震棒变形超过屈服位移 6 mm, 则需增加减震棒数量并重新验算, 直到满足要求。

2) 设计地震下位移验算

相对规则桥梁可采用等效线性化方法进行抗震设计, 根据设计位移 (30 mm) 确定减震棒的等效刚度; 将减震棒的阻尼贡献作为安全储备, 以多振型分解反应谱法验算减震棒的位移值, 满足计算位移小于设计准则中的设计位移限值; 非规则及较为复杂桥梁建议采用非线性时程分析法。

此外, 对罕遇地震下减震棒及全桥的抗震安全性验算也建议采用非线性时程分析法。

1.2 减震棒和拉索限位器组合减震系统

桥梁减震设计一般要求减震装置有足够的恢复力, 以避免发生过大的墩梁位移响应及残余位移。如美国 AASHTO 桥梁隔震指南^[11]中规定: 减震装置的变形从 0.5 倍的设计位移增加到 1.0 倍设计位移时, 其恢复力增量不宜低于其上部结构重量的 0.025 倍。日本“311”地震中部分桥梁橡胶支座

的损伤和破坏也说明了减震系统应提供足够恢复力的重要性^[12]。

高速铁路桥梁对梁体位移的控制指标比公路桥梁要严格得多,采用减震榫的高速铁路桥梁,因减震榫屈服后刚度较低,在罕遇地震下将难以有效控制减震系统的位移(即墩梁相对位移),特别是在具有速度脉冲效应的近断层地震动作用下更为致命,现有研究和本文随后的分析都表明:相对远断层(或近断层无速度脉冲)地震动,近断层脉冲型地震动会显著增大减震系统的位移。为此,本文提出减震榫和拉索限位器组合的减震系统,以解决高速铁路桥梁在近断层地震动下的抗震问题。拉索限位器的构造及其力学模型如图4所示,图中 F , d , k_1 和 G_c 分别为限位器的恢复力、位移、刚度和初始间隙。

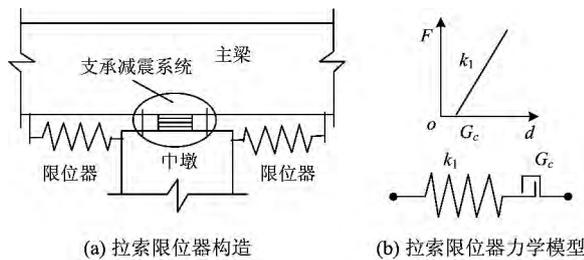


图4 拉索限位器构造及其力学模型

1.2.1 设计准则

当减震榫达到或超过设计位移时,拉索限位器开始工作,即拉索限位器的间隙取值为减震榫的设计位移,目的是保护减震榫在罕遇地震下的位移不超过设计极限位移,即提供控制墩梁相对位移的辅助措施,力学上相当于给减震榫提供了附加的屈服后刚度。

1.2.2 设计方法

由设计准则可知拉索限位器发挥作用时减震榫已经处于屈服状态,桥墩亦有可能损伤,此时桥梁结构的性能状态非常复杂。因此,拉索限位器的设计需要通过非线性时程分析及试算的方法确定,初次试算的刚度取值建议借鉴AASHTO隔震指南中关于减震装置恢复力的要求,即当减震榫的变形从限位器发挥作用到减震榫达到极限位移时,减震榫与限位器的恢复力增量之和应大于上部结构重量的0.025倍。

2 高速铁路桥梁减震设计实例

以1座高速铁路通用的预应力混凝土连续梁桥

(40+64+40)m为对象进行减震设计,该桥上部结构为变截面混凝土箱梁,下部结构为流线型圆端实体墩,墩高等参数如图5所示。桥址位于Ⅷ度区,设计地震加速度峰值为0.2g,罕遇地震加速度峰值为0.38g。为考虑邻跨影响,在连续梁两端各设1孔标准32m简支箱梁,邻跨的简支梁不采用减震设计,分别在1#和6#墩上设置固定支座。



图5 桥梁结构示意图(单位:m)

2.1 减震榫设计

减震榫采用文献[10]中建议的结构和参数,具体如图1所示。按照上述设计准则和方法进行初步减震设计。

1) 正常使用阶段

桥上列车制动力按列车竖向静活载的10%计算,为960kN;而滑动支座的摩擦力 $f=0.02 \times 66\,000\text{ kN}=1\,320\text{ kN}$,即滑动支座的摩擦力可抵抗列车制动力。

2) 多遇地震作用下

当在2#和5#边墩以及3#和4#中墩分别设置7和9根减震榫时,依据铁路工程抗震设计规范并采用减震榫弹性刚度,通过反应谱分析得到减震榫的变形为4.7mm,小于6mm,减震榫未屈服,满足要求。

3) 设计地震作用下

取设计目标位移下减震榫的等效刚度进行反应谱分析,得到减震榫的变形为26.3mm,减震榫变形未超过设计目标位移,亦满足要求。

2.2 拉索限位器设计

拉索限位器的初始间隙采用减震榫的设计位移(30mm),运用时程分析,采用试算的方法确定其刚度;当其刚度取 $60\,000\text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 时,减震榫在罕遇的近断层脉冲型地震动下的最大变形小于其极限位移(72mm),可确保其处于安全状态。

3 近断层地震动下高速铁路减震桥梁的地震响应分析

采用有限元分析软件SAP2000进行高速铁路减震桥梁的建模和时程响应分析。

3.1 分析模型及其参数

桥墩和主梁采用梁柱单元模拟,盆式橡胶支座

采用非线性连接单元模拟，限位器采用 Hook 单元模拟，减震棒采用连接单元（Kinematic 模型）模拟，考虑邻跨的影响及伸缩缝处的碰撞作用，不考虑桩—土—结构的相互作用，即在墩底固结。结合文献 [10] 的推荐和本文的分析，减震棒滞回参数的取值为屈服位移 $d_y = 0.006 \text{ m}$ ，极限位移 $d_u = 0.072 \text{ m}$ ，屈服荷载 $F_y = 325 \text{ kN}$ ，极限荷载 $F_u = 383 \text{ kN}$ 。结构采用瑞利阻尼，阻尼比取 2%。通过在墩底设置非线性弹簧单元模拟塑性铰的非线性力学行为，等效塑性铰长度按文献 [13] 给出的公式计算，塑性铰的滞回参数见表 1。

表 1 桥墩的弯矩和曲率

桥墩	曲率/ km^{-1}		弯矩/ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	
	屈服	极限	屈服	极限
1# (6#)	7.95	93.43	37 340	37 840
2# (5#)	7.18	88.37	30 920	31 370
3# (4#)	8.08	86.01	62 520	64 170

3.2 地震动输入和分析工况

近断层脉冲型地震动的突出特点是具有速度脉冲特性，主要体现为向前方向性效应和滑冲效应（永久位移效应）。

为了研究不同速度脉冲类型的近断层地震动对减震桥梁的影响，本文选择了台湾 Chi-Chi 地震和美国 Northridge 地震中具有速度脉冲特征的 20 条脉冲型近断层地震动和 10 条无脉冲效应的地震动记录，见表 2。其中，Chi-Chi 地震（台站名以“TCU”开头）记录到了具有向前方向性效应和滑冲效应的速度脉冲，而 Northridge 地震只记录到了具有向前方向性效应的速度脉冲，更详细信息见文献 [14]。

向前方向性效应发生在断层破裂前锋朝向观测点传播且传播速度接近于岩层破裂速度时，其速度脉冲主要发生在垂直于断层面的方向，其速度脉冲呈现为双向往复形式；滑冲效应是指临近断层场地中某一方向的位移时程由于断层滑动突然升高或降低而形成台阶，引起的速度脉冲通常平行于断层滑动的方向，且呈单向形式。图 6 和图 7 分别给出了向前方向性效应地震动 TCU054-EW 和滑冲效应地震动 TCU052-EW 的速度和位移时程曲线。

时程分析时沿顺桥向输入加速度峰值分别取 0.2g 和 0.38g 代表设计和罕遇的地震动，并取各类地震动的响应平均值作为分析依据。分析工况有 3 种。①工况 1：设置固定支座的传统非减震桥梁，即 3# 墩安装固定支座，其余安装滑动支座，无任

表 2 输入地震动记录

脉冲类型	台站分量	峰值加速度/ g	峰值速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	峰值位移/ cm
近断层向前方向性效应	TCU051-EW	0.160	51.53	124.52
	TCU054-EW	0.146	45.96	121.47
	TCU082-EW	0.226	51.54	152.35
	TCU102-EW	0.304	87.16	163.13
	TCU120-EW	0.228	62.58	107.63
	RRS-228	0.838	166.05	28.78
	SCS-052	0.612	117.45	53.47
	SCE-288	0.493	74.58	28.69
	JEN-022	0.424	106.22	43.06
	SYL-360	0.843	129.71	32.68
近断层滑冲效应	TCU052-NS	0.488	220.64	723.27
	TCU052-EW	0.356	182.96	506.73
	TCU065-EW	0.789	132.29	194.31
	TCU067-EW	0.499	97.26	186.16
	TCU068-NS	0.365	291.94	867.76
	TCU068-EW	0.505	279.88	709.11
	TCU075-EW	0.332	116.05	171.07
	TCU076-EW	0.343	69.29	108.55
	TCU087-NS	0.113	45.2	93.09
	TCU128-EW	0.144	60.58	145.39
无速度脉冲效应	TCU071-EW	0.528	69.83	170.60
	TCU072-EW	0.476	85.51	223.86
	TCU078-EW	0.442	42.14	98.88
	TCU079-EW	0.589	64.49	173.20
	TCU089-EW	0.354	45.43	194.62
	KAT-090	0.640	37.84	5.09
	PKC-360	0.433	51.49	7.21
	SPV-360	0.939	76.60	14.95
	STC-180	0.477	61.48	22.06
	TAR-360	0.990	77.62	30.45

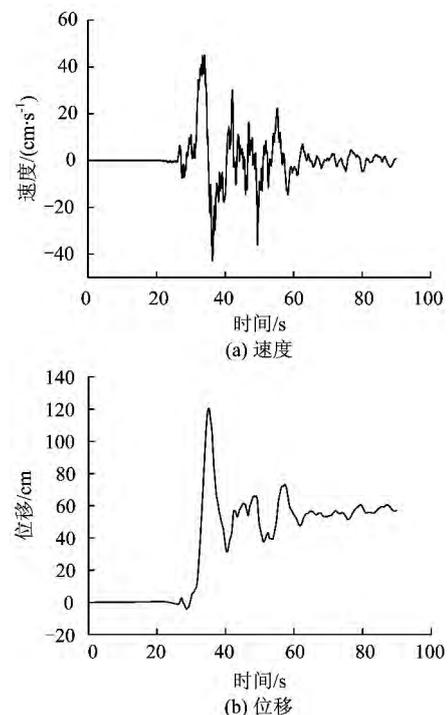


图 6 向前方向性效应脉冲的地震动 TCU054-EW

何减震装置,用于比较减震系统的减震效果。②工况2:采用减震棒的减震桥梁,即将3#墩的固定支座改为活动支座,在中墩和边墩上设置减震棒。③工况3:采用减震棒和拉索限位器的减震桥梁,以验证本文提出的组合减震系统的有效性。工况2和工况3中减震棒和拉索限位器采用本文设计。

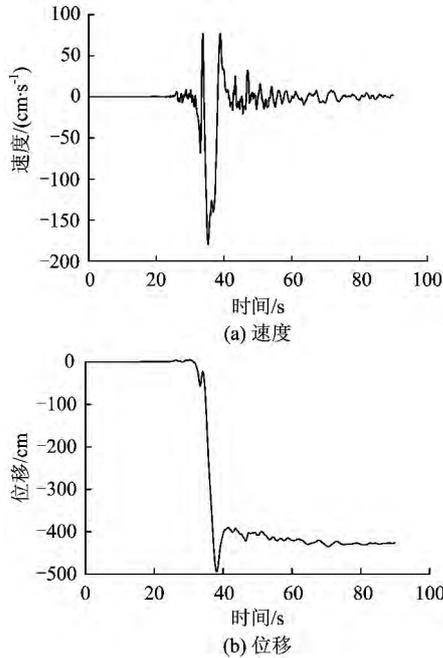


图7 滑冲效应脉冲的地震动 TCU052-EW

3.3 组合减震系统的地震响应

减震棒屈服后增加了结构的柔性且会延长结构周期,结构的变形也主要集中在减震棒,故减震棒在地震中的工作情况决定着整个结构的抗震性。表3为3#墩上减震棒在设置限位器前后的变形情况。由表3可以看出:不设限位器时,在无速度脉冲地震动作用下,减震棒的变形在设计范围内,其抗震安全性可以得到保证。但是,当承受具有速度脉冲的近断层地震动作用时,在设计地震(0.2g)下减震棒的变形超过设计位移,接近40mm;在罕遇地震(0.38g)下其变形远远超过了极限位移,达到100mm。可见,由于减震棒本身的位移能力和屈服后刚度相对有限,在罕遇脉冲型近断层地震作用下很难控制其变形,这是提出减震棒与限位器组合减震方案的重要原因。为控制减震棒在速度脉冲近断层地震作用下的过大变形,按照1.2节中提出的拉索限位器设计准则和方法,分别在3#和4#墩上安装拉索限位器。设置限位器后,在具有速度脉冲近断层(罕遇)地震下,减震棒位移从大于100mm下降至70mm以内,位移控制效果明显。

但在设计地震(0.2g)下的位移超过了其设计位移(30mm),即未能使减震棒的变形控制在设计位移以内。然而为了最大限度地发挥减震棒的减隔震作用且在非近断层地震动下不至过于保守,本文认为组合减震系统仍然有效。若想控制设计地震下减震棒的变形,可通过调整拉索限位器的初始间隙以及在边墩处设置限位器等方式实现。

表3 设置限位器前后不同近断层地震作用下3#墩上减震棒的变形

地震动类型	减震棒变形/mm			
	工况2		工况3	
	0.2g	0.38g	0.2g	0.38g
向前方向性	45.8	104.4	42.6	65.0
滑冲效应	39.2	111.2	36.9	64.2
无速度脉冲	24.8	50.6	24.3	46.9

设置限位器可能会放大桥墩的内力和变形,表4给出了设置限位器前后3#墩墩底的弯矩。可以看出:在设计和罕遇地震下,设置限位器均放大了墩底弯矩,放大程度在15%左右;在设计地震下,墩底弯矩均小于屈服弯矩,桥墩保持弹性;在罕遇地震下,平均墩底弯矩大于屈服弯矩,桥墩进入屈服状态,但其塑性曲率较小,均在可接受范围内。

表4 设置限位器前后不同近断层地震作用下3#墩墩底弯矩

地震动类型	墩底弯矩/(kN·m)			
	工况2		工况3	
	0.2g	0.38g	0.2g	0.38g
向前方向性	52 123	60 491	53 831	62 974
滑冲效应	50 046	59 754	52 552	62 712
无速度脉冲	49 456	57 241	49 456	57 343

3.4 减震效果分析

我国传统连续梁桥一般在每联设置1个固定墩,在地震作用下,固定墩承受大部分上部结构传递的惯性力,使得固定墩和固定支座容易发生破坏。采用减震装置后,所有桥墩均承担地震力,使得各墩地震力分配更趋均匀、合理。表5给出了在设计地震作用下,边墩和中墩的墩顶位移。可见:当不采用减震装置时(工况1),墩顶位移主要集中在固定墩上,不同类型的地震动皆可导致固定墩屈服(屈服位移39mm),而边墩的位移和分担的地震力很小;当采用组合减震系统后,中墩和边墩共同承担地震力,皆处于弹性状态。

本文采用减震率^[9]表示减震装置的减震效果。依据表3计算得到的设计地震下3类地震动对应的

表 5 设置组合减震系统前后不同近断层地震作用下墩顶位移

地震动类型	墩顶位移/mm			
	2# 边墩		3# 中墩	
	工况 1	工况 3	工况 1	工况 3
向前方向性	0.31	2.3	73.9	15.4
滑冲效应	0.30	2.3	76.8	14.9
无速度脉冲	0.27	2.2	41.4	13.9

墩顶位移减震率分别为 79.2%，80.6% 和 66.3%。可见：本文提出的组合减震系统可以达到较好的减震效果，不同类型地震动作用下的减震率基本在 60% 以上，脉冲型近断层地震动下的减震率比无脉冲近断层地震动的高，且 2 种脉冲型地震动下的减震率相差不多，都接近 80%，这是以减震樨发生较大塑性变形和耗能为前提的。

综上所述，从所有桥墩共同承担地震力的角度来看，采用减震樨和拉索限位器的组合减震系统有

效地改善了该桥的抗震性能，即使遭遇具有速度脉冲特性的近断层地震动作用，也仍能保证其安全。

4 结 语

针对高速铁路桥梁建设可能临近断层及其所面临的抗震问题，本文提出了采用减震樨和拉索限位器组合的减震系统，在性能设计框架下给出了设计准则和设计方法。以高速铁路中通用的 3 跨连续梁桥为设计案例进行减震设计，并输入具有速度脉冲和无速度脉冲效应的地震动进行非线性时程分析，研究了减震桥梁的抗震性能和减震效果。结果表明：仅采用减震樨的减震桥梁，在速度脉冲型近断层地震作用下可能因减震樨变形过大而不安全；加设拉索限位器后，有效地控制了脉冲型近断层地震作用下减震樨的变形，而且在不同类型的地震动作用下其减震率都在 60% 以上。

参 考 文 献

- [1] PARK S W, GHASEMI H, SHEN J, et al. Simulation of the Seismic Performance of the Bolu Viaduct Subjected to Near-Fault Ground Motions [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2004, 33 (13): 1249-1270.
- [2] BESSASON B, HAFLIDASON E. Recorded and Numerical Strong Motion Response of a Base-Isolated Bridge [J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20 (2): 309-332.
- [3] JÓNSSON M H, BESSASON B, HAFLIDASON E. Earthquake Response of a Base-Isolated Bridge Subjected to Strong Near-Fault Ground Motion [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2010, 30 (6): 447-455.
- [4] 于芳, 温留汉·黑沙, 周福霖. 设置限位器的双向隔震铁路桥梁动力响应特性研究 [J]. *土木工程学报*, 2010, 43 (增 1): 345-351.
(YU Fang, WENLIUHAN Heisha, ZHOU Fulin. Research on the Dynamic Performance of Railway Bridge Bidirectional Seismic Isolation Bearings with Deformation Restrict [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43 (Supplement 1): 345-351. in Chinese)
- [5] 张常勇, 钟铁毅, 季文刚. 铁路连续梁桥横向减隔震支座参数研究 [J]. *中国铁道科学*, 2011, 32 (4): 19-23.
(ZHANG Changyong, ZHONG Tieyi, JI Wengang. Study on the Parameters of the Transverse Seismic Isolation Bearings of Railway Continuous Beam Bridge [J]. *China Railway Science*, 2011, 32 (4): 19-23. in Chinese)
- [6] 钟铁毅, 吕吉应, 张常勇. 铁路隔震连续梁桥地震碰撞响应研究 [J]. *中国铁道科学*, 2012, 33 (3): 16-20.
(ZHONG Tieyi, LÜ Jiyi, ZHANG Changyong. Study on the Seismic Pounding Responses of Seismically Isolated Railway Continuous Beam Bridge [J]. *China Railway Science*, 2012, 33 (3): 16-20. in Chinese)
- [7] 杨文武. 台湾高速铁路 C270 标段高架桥设计概述 [J]. *铁道学报*, 2007, 29 (3): 132-136.
(YANG Wenwu. A Brief Overview of C270 Viaduct Design of Taiwan HSR Project [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2007, 29 (3): 132-136. in Chinese)
- [8] 张多平. 郑西客运专线渭南渭河特大桥设计综述 [J]. *铁道标准设计*, 2009 (11): 43-48.
(ZHANG Duoping. Comprehensive Summary for Design on Weinan Weihe River Super Large Bridge on Zhengzhou-Xi'an Passenger Dedicated Line [J]. *Railway Standard Design*, 2009 (11): 43-48. in Chinese)
- [9] 石岩, 王东升, 孙治国. 近断层地震动下减隔震桥梁地震反应分析 [J]. *桥梁建设*, 2014, 44 (3): 19-24.
(SHI Yan, WANG Dongsheng, SUN Zhiguo. Analysis of Seismic Response of Seismically Mitigated and Isolated Bridges Subjected to Near-Fault Ground Motion [J]. *Bridge Construction*, 2014, 44 (3): 19-24. in Chinese)

- [10] 李承根, 高日. 高速铁路桥梁减震技术研究 [J]. 中国工程科学, 2009, 11 (1): 81-86.
(LI Chenggen, GAO Ri. Study on the Shock Absorbing Technique of High Speed Railway Bridges [J]. Engineering Science, 2009, 11 (1): 81-86. in Chinese)
- [11] AASHTO. Guide Specifications for Seismic Isolation Design [S]. 3rd ed. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2010.
- [12] TAKAHASHI Y. Damage of Rubber Bearings and Dampers of Bridges in 2011 Great East Japan Earthquake [C] // Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake. Tokyo: 2012.
- [13] PAULAY T, PRIESTLEY M J N. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1992.
- [14] 杨迪雄, 潘建伟, 李刚. 近断层脉冲型地震动作用下建筑结构的层间变形分布特征和机理分析 [J]. 建筑结构学报, 2009, 30 (4): 108-118.
(YANG Dixiong, PAN Jianwei, LI Gang. Deformational Distribution Feature and Mechanism Analysis of Building Structures Subjected to Near-Fault Pulse-Type Ground Motions [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30 (4): 108-118. in Chinese)

Seismic Isolation Design for High Speed Railway Bridge under Near-Fault Ground Motions

SHI Yan^{1, 2}, WANG Dongsheng^{1, 2}, SUN Zhiguo^{1, 2}

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian Liaoning 116026, China;

2. Key Laboratory of Highway Engineering of Liaoning Province, Dalian Liaoning 116026, China)

Abstract: Based on the design idea of “functional separation”, a new seismic isolation system including steel energy absorbers and cable restrainers was proposed for high speed railway bridges. The steel energy absorbers reduced the seismic response of bridge through yield energy dissipation. The cable restrainers were effective in controlling the excessive deformation of steel energy absorbers and falling-off prevention. The design criteria and methods for steel energy absorbers and cable restrainers under frequent earthquake, design earthquake and rare earthquake were given respectively. Taking a continuous beam bridge for high speed railway as an example, three groups of ground motions with distinct characteristics such as forward rupture directivity, fling-step effect and without velocity pulse were selected as seismic excitation. The seismic performance of bridge with new seismic isolation system was investigated. Results indicate that the bridge isolated with steel energy absorbers alone is not safe due to the excessive deformation of steel energy absorbers under near-fault ground motions with velocity pulse. Cable restrainers can effectively control the deformation of steel energy absorbers and the relative displacement of piers and beams. The seismic performance of the bridge of the new isolation system with steel energy absorbers and cable restrainers is effectively improved, and the decreasing ratio of seismic response can exceed 60%.

Key words: Bridge; Near-fault ground motion; Seismic isolation design; Steel energy absorber; Cable restrainer; High speed railway

(责任编辑 吴彬)