

# 连梁装置在地震序列作用下的作动分析

方磊,张煜敏

长安大学公路学院,西安 710064

**摘要** 地震荷载是一种随机荷载,桥梁结构受到罕遇或超预期地震作用时,抗震措施能够有效地减小地震荷载的破坏程度。连梁装置是公路桥梁防落梁系统中的最终安全保护措施,用于避免桥梁上、下部结构相对位移过大、支座丧失支承功能后发生落梁。结合国内外连梁装置的相关设计标准,对设拉索式连梁装置的结构进行罕遇地震及强震序列动力时程分析,得出连梁装置的防落梁效果及内力随其拉索长度、设计位移量的变化规律。在地震作用下,经合理设计的连梁装置起到防落梁效果,增大结构的整体性、提高结构的抗推刚度,使地震荷载在各墩间平均分配。连梁装置在整个强震序列激励过程中均起到防落梁作用,可保证有损结构的通行能力,达到“大震不倒”的抗震设计原则。

**关键词** 桥梁工程;连梁装置;罕遇地震;强震序列

**中图分类号** U441.3

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.13.002

## Unseating Prevention Devices Under the Excitation of Earthquake Sequence

FANG Lei, ZHANG Yumin

School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China

**Abstract** Earthquake load has the character of random. The uses of anti-seismic measures have been proved to be effective on the reduction of bridge seismic damage when the bridges encounter with rare earthquake or unexpected earthquake. Unseating prevention devices are the ultimate security installment in the collapse-proof system, which used to protect the substructure falling down from piers as the supports lose their effectiveness. Based on relational design standards at home and abroad, time-history analysis has been conducted on the structure with cable-unseating prevention devices under rare earthquake and strong earthquake sequence. The variation laws involving the collapse-proof result of unseating prevention devices and effect of collapse-proof changing with both cable length and designed value for displacement have been obtained. Under rare earthquake, the rational unseating prevention devices could provide the ultimate security to the structure, increase the integrity and anti-pushing rigidity of the structure, and make the seismic load to be well-distributed among the piers. The unseating prevention devices are able to provide the ultimate security for the damaging structure under the strong earthquake sequence; and achieve the request that there is no collapse when strong earthquake occurs.

**Keywords** bridge engineering; unseating prevention devices; rare earthquake; strong earthquake sequence

### 0 引言

地震荷载受到地震规模、传播距离、土层结构和土质条件的影响,是一种随机荷载,其强度、持续时长、规模均无法预料。地震动荷载常以序列形式出现,在空间和时间上均有丛集特征<sup>[1]</sup>。在一定时间内,发生在同一震源区、发震机制具有某种内在联系或有共同的发震构造的一系列地震总称为地震序列<sup>[2]</sup>。现有各国规范对桥梁结构提出的抗震设计只考

虑了主震,没有考虑地震序列中的强余震对结构抗震性能的影响<sup>[3]</sup>。针对抗震设计不能进行完全定量计算的情况,抗震措施被用于设防未预期地震引起的震害,并已被证明可有效减轻桥梁的震害<sup>[4]</sup>。当地震荷载下桥梁结构的支座丧失约束能力,梁与桥墩(台)的相对位移过大,便会发生落梁。落梁震害会导致桥梁结构在地震中破坏或失去通行功能,严重阻碍抗震救灾工作。多震区的城市,要达到最大限度地减轻灾害,最

收稿日期:2010-12-20;修回日期:2011-04-07

基金项目:交通部规范编制项目

作者简介:方磊,博士研究生,研究方向为桥梁结构理论及分析、桥梁桩基承载力,电子邮箱:fanglei\_chd@126.com

佳选择就是提高建筑物的抗震性能<sup>[5]</sup>。连梁装置是防落梁系统的最终安全装置,用以保证桥梁结构在遭遇罕遇地震及超预期地震时不发生落梁。

美国、日本、加拿大等国的桥梁规范中均有防落梁系统的相关规定,但因各国桥梁结构设计的差别较大,其研究结果并不能指导中国防落梁系统的设计。日本在 2002 年的《道路桥示方书·同解说·V 耐震设计篇》中特别要求将支座、连梁装置作为主要结构构件进行设计<sup>[6]</sup>。美国 AASHTO 规范也对防落梁系统有所规定,但主要针对的是限位装置设计,对连梁装置的研究较少。

国内对防落梁系统的研究还处于起步阶段,中国规范没有对连梁装置的设计方法进行详细规定。长安大学刘健新教授的相关研究以及朱文正、张煜敏的论文结论认为<sup>[7-9]</sup>,采用  $W/2$  (静力法) 对连梁装置进行设计没有考虑到其动力作用,相对于日本规范所采用的 1.5 倍恒载反力法作用于连梁装置上的荷载太小。

本文结合国内外连梁装置的相关设计标准,选择常用桥梁型式进行大震时程分析,采用 1.5 倍的恒载反力法对该桥的连梁装置进行设计,研究连梁装置的受力特点及其在地震中的防落梁效果,得出连梁装置对损伤结构抗震性能的影响及其在地震序列中的作动规律。

## 1 连梁装置的类型和选取

连梁装置的类型总体上分为连接型和阻挡型两种。

连接型连梁装置中亦有很多形式,大多用于防止纵桥向落梁的发生。连接板式、连接杆式、拉索连接式连梁装置可以防止纵向落梁,主要用于现有桥梁的加固。其中预应力钢绞线连接式连梁装置是一种新的形式,具有缓冲性能好、耐久性强、柔性大等优点,还可以根据弹簧的变形,推测出由荷载引起的上、下部构造间的相对位移量。耗能型连梁装置在限制梁体位移的同时,利用黏性阻尼等吸收耗散振动能量,达到减小地震作用的目的。

阻挡式的连梁装置一般采用梁与下部结构连接的形式<sup>[8]</sup>,包括锚栓式、钢托架式以及挡块式,均可防止桥梁纵、横向落梁。钢托架式的连梁装置大量用在钢桥上。挡块式连梁装置在桥轴方向与梁间连接装置的功能基本相同,垂直桥轴方向的挡块用于防止梁体在该方向出现过位移而落梁。

大量调查发现,落梁震害通常发生在纵桥向,因此优先选用控制纵桥向位移的连梁装置。对各类连梁装置进行比较分析,拉索式连梁装置的优点在于其柔韧性,使之适用于不同形式的上部结构,此类装置亦可控制设计位移量,因此本文选择连接主梁与桥墩的拉索式连梁装置作为研究对象。

## 2 结构和连梁装置模拟

### 2.1 桥梁结构动力时程分析

本文采用的算例为某  $5\text{m}\times 30\text{m}$  的连续梁桥。梁宽 17m、高

1.6m,墩高 10m,墩径 1.8m,边墩采用滑板支座,中墩采用板式支座。主梁材料为 C50 混凝土,盖梁和桥墩采用 C30 混凝土。采用有限元软件 Midas/Civil 进行结构建模,主梁、盖梁与桥墩均采用梁单元,支座模拟为弹性连接,墩底固结,不考虑桩基作用,模型如图 1 所示。

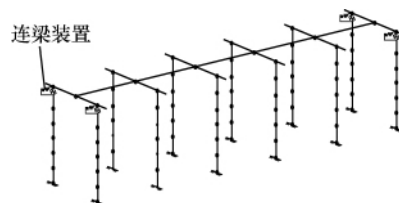


图 1 桥梁结构有限元模型

Fig. 1 Finite-element modal of bridge

选用直接积分法对结构进行地震响应非线性时程分析,随机选择某工程场地安评报告的大震时程波作为设计地震力对桥梁结构进行分析,该地震时程为某场地 100 年超越概率为 2% 的地震时程,峰值加速度  $0.371g$ ,地震持续时长 44s,如图 2 所示。大震时程分析结果如表 1 所示。

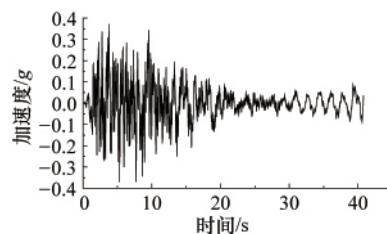


图 2 设计地震动时程

Fig. 2 Acceleration time history of designed earthquake

表 1 桥梁结构大震分析结果  
Table 1 Results of bridge structure analysis under large earthquake

	主梁位移 /cm	墩顶位移 /cm	相对位移 /cm	墩底弯矩 /(kN·m)
边墩	25.02	0.89	24.13	3694
中墩	24.96	12.89	12.07	17399

计算发现,地震激励下结构的支座位移量  $0.241\text{m}$  已超过支座的允许剪切变形量 ( $0.0795\text{m}$ ),主梁落座已经发生,需要采用连梁装置防止结构发生落梁。

### 2.2 连梁装置设计

对于连梁装置的设计方法,中国规范并没有详细的规定,相关研究认为将梁重的 50% (美国 AASHTO 规范) 作为连梁装置的设计荷载过于保守,日本规范要求所有连梁装置的设计抗拉力等于支座反力的 1.5 倍 (以下称为 1.5 倍恒载反力法)<sup>[8]</sup>,结合相关研究<sup>[9-10]</sup>,本文采用 1.5 倍的恒载反力法对连梁装置进行设计。

采用 1.5 倍恒载反力法设计桥梁结构的连梁装置, 将结构自重和二期恒载组合作用下的结构反力进行统计, 得到上部结构的支座反力  $R_d$ , 计算连梁装置的设计承载力  $H_F=1.5R_d=2526.39\text{kN}$ 。选择抗拉设计强度  $\sigma_b=1670\text{MPa}$  的拉索, 型号为 PES (H)5-061, 桥梁单侧所有连梁装置的总破断索力  $P_b=4000\text{kN}$ 。

连梁装置在正常工作状态下或小震时不发挥作用, 使上部结构可自由伸缩或振动; 大震到来时开始发挥作用, 限制上部结构振动, 使上、下部结构相对位移不致过大。采用可控制位移量的非线性单元模拟连梁装置, 其有限元模型如图 3 所示, 作用原理如图 4 所示。

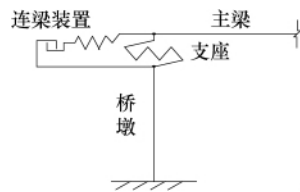


图 3 连梁装置有限元模型

Fig.3 Simplified model of unseating prevention devices

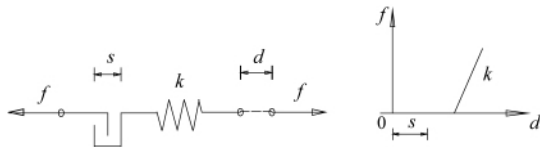


图 4 连梁装置的作动机制和荷载-位移关系

Fig.4 Action mechanism and load-displacement curves of unseating prevention devices

图 4 中,  $s$  为连梁装置的初始间隙, 其数值即为控制连梁装置起动的设计位移量;  $d$  为桥梁上、下部结构相对位移;  $k$  为连梁装置的刚度;  $f$  为连梁装置设计承载力, 按下式取值:

$$f = \begin{cases} k(d-s) & d-s \geq 0 \\ 0 & d-s < 0 \end{cases}$$

### 3 连梁装置作用效果分析

#### 3.1 连梁装置的作用效果分析和最优方案

连梁装置初始间隙以及拉索的长度均会影响到其防落梁效果, 本文对设置不同初始间隙、拉索长度连梁装置的桥梁结构在大震激励下的计算结果进行对比, 以得出结构抗震能力及连梁装置作用效果随参数的变化规律。

将设置连梁装置桥梁的上、下部结构相对位移与未设置连梁装置的桥梁相对比, 发现桥梁上、下部结构相对位移及结构内力随连梁装置拉索长度的增长变化很小。随着初始间隙的增大主梁位移、上下部结构相对位移、结构的内力相应变化较大。0.8、1.4、2.0m 连梁装置在仅改变初始间隙时, 上、下部结构相对位移较原结构相对位移的减小程度如图 5 所示, 初始间隙越小相对位移的减小幅值越大, 连梁装置越早

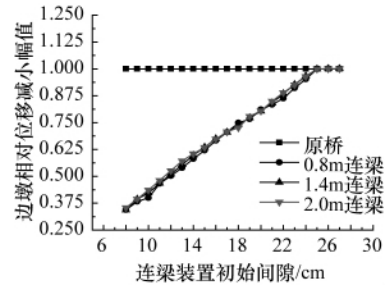


图 5 梁墩相对位移随初始间隙变化规律

Fig. 5 Change rule of displacement between beam and pier with primary clearance

发挥作用, 其防落梁效果越好。连梁装置初始间隙为 8cm 时, 桥梁上、下部结构的相对位移可减至原结构的 35%。

当连梁装置起动之后, 便开始受力, 连梁装置内力随拉索长度的增大逐渐减小, 随初始间隙的增大呈先增大后减小趋势。0.8、1.4、2.0m 连梁装置的内力随初始间隙的变化规律如图 6 所示, 在初始间隙值约为 15cm 时, 连梁装置的内力达到最大值, 初始间隙达到 26cm 后连梁装置不再发挥作用。且 0.8m 的连梁装置在采用初始间隙时出现了内力超过连梁装置拉索屈服拉力 4000kN 的情况。

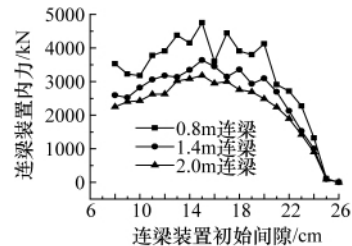


图 6 连梁装置内力随初始间隙变化规律

Fig. 6 Change rule of internal force of unseating prevention devices with primary clearance

据对比结果, 推荐采用初始间隙较小、拉索长度较长的连梁装置(初始间隙 8cm, 拉索长度为 2m), 以保证在连梁装置不被拉断的情况下达到较好的防落梁效果。

#### 3.2 设置最优连梁装置后结构地震响应结果

将采用推荐连梁装置的结构在大震地震动时程作用下所得的内力、位移计算结果进行统计, 并与未设置连梁装置的结果作对比, 如表 2 所示。

采用该连梁装置后, 得到连梁装置的最大内力为 2488kN, 小于其破断力 4000kN, 未发生破坏。

由表中数值可见, 结构设置连梁装置后, 主梁位移和上下部结构相对位移均有减小, 连梁装置起到了防落梁作用, 限值了上部结构位移。边墩的墩顶位移与墩底弯矩均有增大, 说明连梁装置的作用使得结构的整体性及抗推刚度均有增加, 使边跨桥墩参与分担地震荷载, 地震力在各墩间平均分配。

表 2 桥梁结构地震响应结果统计表

Table 2 Statistical table of bridge structure seismic response under earthquake sequence

	主梁位移/cm		墩顶位移/cm		相对位移/cm		墩底弯矩/(kN·m)	
	边墩	中墩	边墩	中墩	边墩	中墩	边墩	中墩
未设置连梁装置	25.02	24.96	0.89	12.89	24.13	12.07	3694	17399
设置连梁装置	15.96	16.04	7.42	6.32	8.55	9.72	16091	14973
两方案比值	0.64	0.64	8.34	0.49	0.35	0.80	4.36	0.86

#### 4 地震序列作用下连梁装置作用效果分析

##### 4.1 考虑地震序列的必要性

目前,国内外对地震序列作用下结构物的破坏研究很少涉及。桥梁结构在地震序列作用时,不仅会受到主震的激励,更会在主震后受到强余震的作用,往往结构的破坏就在余震激励下发生<sup>[1]</sup>。如中国 1976 年发生的 M7.8 级唐山大地震中,主震后 15h 内发生 M6.8 和 M7.1 级强余震各一次。滦河大桥在主震中并未倒塌,而是在 M7.1 的强余震中发生桥墩折断、桥梁落架、倒塌,当时该桥正在忙于救灾运输。

作为防止落梁事件发生的最终安全装置,连梁装置应满足结构在遇到超预期地震作用下仍能保证桥梁的交通运输功能,因此在地震序列作用时连梁装置应起到其最后一道防线的作用。

##### 4.2 地震序列作用下的结构响应

在强震数据库中抽取较有代表性的集集地震序列时程文件作为地震荷载用于结构,进行抗震计算分析,该地震序列的各项参数如表 3 所示。

地震序列的主震与各强余震的发生时间间隔较长,具有

表 3 集集强震序列时程参数统计表

Table 3 Parametric statistical table of Chi-Chi earthquake sequence

	主震	余震 1	余震 2	余震 3
发生时间	09-20 17:47	09-20 17:57	09-20 18:03	09-25 23:52
持续时长/s	65	50	40	40
震级	7.62	5.9	6.2	6.3
峰值 加速度/g	0.3927	0.0522	0.4344	0.3425

独立性,在对结构弹塑性时程分析时,采用各次地震依次输入的累积方式,后续地震在结构振动稳定后的基础上进行。

将地震序列作用下设置连梁装置的桥梁结构动力响应结果与未设置连梁装置结构的结果进行对比,以得到连梁装置在整个强震序列激励下的作用机制及防落梁效果,将其对比结果列于表 4。

表 4 桥梁结构设连梁装置后计算结果

Table 4 Calculation result of bridge structure with unseating prevention devices under earthquake sequence

		主梁位移/cm		墩顶位移/cm		梁墩相对位移/cm		墩底弯矩/(kN·m)	
		边墩	中墩	边墩	中墩	边墩	中墩	边墩	中墩
主震作用	设连梁装置	9.22	9.22	6.22	3.31	2.99	5.91	15208	10005
	两方案比值	0.54	0.54	6.46	0.49	0.19	0.57	3.89	0.68
余震 1 作用	设连梁装置	0.83	0.83	0.27	0.24	0.56	0.59	717	1264
	两方案比值	1.18	1.18	4.14	1.08	0.88	1.23	1.91	1.74
余震 2 作用	设连梁装置	9.70	9.67	4.39	3.50	5.31	6.17	11583	10430
	两方案比值	0.91	0.91	4.08	0.91	0.55	0.90	2.76	1.11
余震 3 作用	设连梁装置	10.56	10.57	4.74	3.64	5.82	6.93	12220	10829
	两方案比值	0.83	0.83	8.80	0.78	0.48	0.86	4.78	0.90

由表中的计算结果及比值可见,设置连梁装置之前,结构在地震序列下的主梁位移、上下部结构相对位移均较大。设置连梁装置后,桥梁结构在强震序列(除余震 1)作用下的主梁位移、上下部结构相对位移均有减小,主震激励下,边墩的上、下部结构相对位移降至原结构的 20%,中墩上的梁、墩相对位移减小至原结构的 56%。上下部结构的相对位移均未超过支座的允许剪切变形量,有效地避免了上部结构落梁的

发生。边墩墩顶位移与墩底弯矩有所增加,且边墩与中墩的弯矩较为接近,说明连梁装置提高了结构的整体性,使边墩也较多地分担了地震荷载。

连梁装置在整个地震序列作用下均发挥了防落梁效果,主震激励下结构边墩墩顶位移时程如图 7 所示。在分析过程中发现,主震激励下,边墩墩底截面保护层混凝土破碎,墩顶产生残余变位,如图 8 所示,后续余震序列均在此变形基础

上发生。墩底塑性破坏的出现是由于连梁装置的作用提高了结构的整体性,边墩参与分担地震传递给结构的能量,使得在主震作用下墩底截面保护层混凝土破碎。

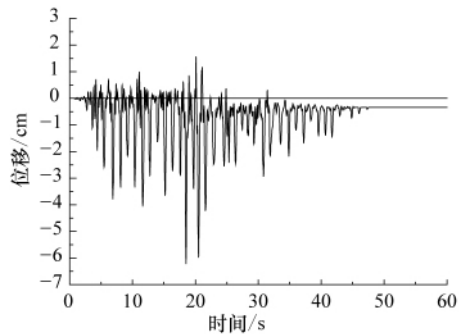


图7 主震激励下结构边墩墩顶位移时程  
 Fig. 7 Displacement time history of side pier top under main earthquake

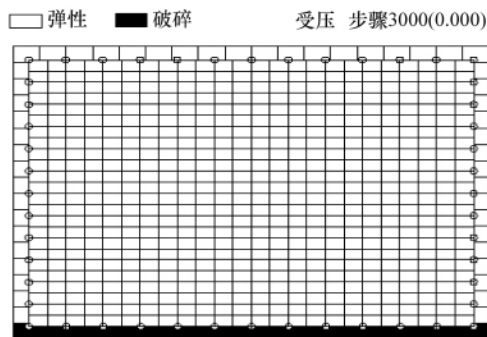


图8 桥墩墩底破坏程度  
 Fig. 8 Destructiveness of pier-bottom

## 5 结论

本文对桥梁结构采用罕遇地震和地震序列进行动力时程分析,据分析结果设计连梁装置作为其防落梁措施,得到桥梁结构的设置连梁装置前后的地震响应,并作对比,分析其对桥梁结构动力响应的影响,所得结论如下:

(1) 地震具有随机、丛集特征,通常其强度与规模均无法预料,在无法预计地震荷载的情况下,桥梁结构上、下部结构的相对位移较大时便会发生落梁,连梁装置作为防落梁系统的最后一道防线,可有效防止落梁震害的发生,以保生命线结构在抗震救灾中发挥作用。

(2) 对会发生落梁的结构设置连梁装置,并对比不同参数连梁装置的防落梁效果。拉索长度一定的连梁装置,其防落梁效果随初始间隙的增大减小,初始间隙在设计位移量范围内取值越小,效果越好。同样初始间隙的连梁装置,改变拉索长度对其防落梁效果影响不大。因此,尽量选择拉索长度较长、初始间隙较小的连梁装置,使其在发挥防落梁效果的同时不致发生断开。

(3) 地震荷载作用下,设置连梁装置的桥梁结构梁体位

移和上、下部结构相对位移均有较大幅度的减小,支座变位亦小于其允许剪切变形量,连梁装置可起到防止落梁的作用。由于连梁装置连接结构的上下部,使得边墩较未设置连梁装置时更多地分担地震荷载,增大了结构的整体性与抗推刚度,使地震力在各墩间平均分配。

(4) 连梁装置在整个地震序列激励下均能发挥防落梁效果。主震作用下,结构边墩墩底发生了塑性破坏,墩顶产生了残余变位,余震序列在此残余变位基础上累积。桥梁结构设置连梁装置可防止落梁的发生,尤其在有较大余震发生时,连梁装置可防止有损结构发生落梁、加重地震灾害。在对结构进行抗震分析时,亦应考虑残余变位的影响。

## 参考文献 (References)

- [1] 周仕勇, 许忠淮. 地震序列研究综述 [J]. 中国地震. 1999, 15 (3): 267-277.  
 Zhou Shiyong, Xu Zhonghuai. *Earthquake Research in China*, 1999, 15 (3): 267-277.
- [2] 钟羽云, 张震峰, 张帆. 不同地震序列类型地震的特征性质研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(2): 205-209.  
 Zhong Yuyun, Zhang Zhenfeng, Zhang Fan. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2005, 25(2): 205-209.
- [3] 丁文胜. 下承式刚架系杆拱桥的抗震设计方法及试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006.  
 Ding Wensheng. *Seismic design method and experimental study on rigid-frame through tied-arch bridges*[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [4] 重庆交通科研设计院. JTG/T B02-01-2008 公路桥梁抗震设计细则 [S]. 2008, 北京: 人民交通出版社.  
 Chongqing Communications Research & Design Institute. *JTG/T B02-01-2008 Guidelines for resistant design for highway bridges* [S]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [5] 孙旻, 曹辉, 宋峰. 提高多震区建筑物抗震能力——保证地震安全的最佳选择[J]. 自然灾害学, 2005, 14(5): 110-112.  
 Sun Min, Cao Hui, Song Feng. *Journal of Natural Disasters*, 2005, 14(5): 110-112.
- [6] Japan Road Association. Design specification of highway bridges, Part V: Seismic design[S]. Tokyo: Maruzen Publishing Company, 2002.
- [7] 刘建新, 胡兆同, 李子青. 公路桥梁减震装置及设计方法研究总报告 [R]. 西安: 长安大学, 2000.  
 Liu Jianxin, Hu Zhaotong, Li Ziqing. *Research on design method and damping devices for bridge*[R]. Xi'an: Chang'an University, 2000.
- [8] 张慧敏. 考虑强震序列作用的连梁装置分析研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.  
 Zhang Yumin. *The analysis of unseating prevention devices considering the excitation of strong earthquake sequence* [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [9] 朱文正, 刘建新. 公路桥梁连梁装置研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (4): 68-72.  
 Zhu Wenzheng, Liu Jianxin. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26(4): 68-72.
- [10] Randall M J, Saiidi M, Marragakis E M, et al. Restraint design procedures for multi-span simply-supported bridges [R]. MCEER-99-0011, Buffalo, NY: MCEER, 1999.
- [11] 李春锋, 张阳, 赵金宝, 等. 台湾集集大地震及其余震的长周期地震动特性[J]. 地震学报, 2006, 28(4): 417-428.  
 Li Chunfeng, Zhang Yang, Zhao Jinbao, et al. *Acta Seismologica Sinica*, 2006, 28(4): 417-428.

(责任编辑 朱宇)