

文章编号:1007-6069(2017)01-0223-07

两种减隔震支座动力参数的设计方法及 减隔震效果差异研究

阮怀圣,何友娣

(中铁大桥勘测设计院集团有限公司 湖北 武汉 430056)

摘要:为探讨强震区梁式桥减隔震支座的合理设计问题,根据设计经验归纳总结了铅芯橡胶和摩擦摆两种减隔震支座动力参数的一般设计方法及流程;针对实桥给出了两种支座的详细动力设计参数,并对参数进行了敏感性分析;根据时程分析结果对减隔震效果差异进行了对比,运用等效线性化理论解释了差异的内在原因。研究表明:支座摩擦系数并不是越大越有利,而应通过分析确定;由于铅芯橡胶与摩擦摆支座等效刚度值的明显不同,导致随着地震作用的提高结构内力响应差别将逐渐减小,而梁端位移响应差别呈显著增大趋势;建议高烈度区桥梁减隔震支座选型宜选用铅芯橡胶支座。

关键词:减隔震支座;铅芯橡胶支座;摩擦摆支座;动力参数;设计方法;减隔震效果;差异
中图分类号:TU378 **文献标志码:**A

Research on dynamic parameter design method of two kinds of base isolation bearing and their effect difference

RUAN Huaisheng, HE Youdi

(China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: To discuss the rational design problems of seismic isolation bearing of girder bridges in meizoseismal areas, this paper summarizes the general design methods and processes of dynamic parameters about the lead plug-rubber and friction pendulum isolation bearing based on design experience, carries out parameter sensitivity analysis after giving details of two dynamic design parameters, compares the isolation effect difference according to the results of time-history analysis, and explains the intrinsic cause of differences by equivalent linear theory. The result indicates that friction coefficient is not the larger the better and it should be determined by analysis. Because of different equivalent stiffness values of lead plug-rubber bearings and friction pendulum, as the seismic action strengthens, the differences of structural earthquake internal force response will gradually reduce, but the differences of displacement response at beam ends will significantly increase. It recommends that type selection of bearing should use lead plug rubber bearings in meizoseismal areas.

Key words: base isolation bearing; lead plug rubber bearing (LRB); friction pendulum bearing (FPB); dynamic parameters; design method; aseismic isolation effect; difference

引言

桥梁是公路和铁路工程中的生命线工程,桥梁抗震成为目前亟待解决的难点问题^[1]。减隔震设计不但

收稿日期:2015-08-11; 修订日期:2016-03-13

作者简介:阮怀圣(1982-),男,高级工程师,主要从事大跨度桥梁抗震与抗风设计研究。E-mail: ranghs@163.com

能够提高结构的抗震性能,而且可以有效降低工程造价,故该法成为目前解决强震区或长联梁式桥抗震设计的主要途径。由于减隔震支座类别多,动力设计参数多且参数与结构的动力响应特性关系复杂,工程设计人员较难把握,为此本文以工程中常用的铅芯橡胶支座和双曲面摩擦摆支座为例,就两种减隔震支座合理的动力设计参数的方法、减隔震效果差异及原因等问题进行了相关研究,以为减隔震支座的合理设计提供参考。

1 减隔震支座构造及原理简介

1.1 铅芯橡胶支座

铅芯橡胶支座(LRB)^[2]是由橡胶片和薄钢板交替叠合后硫化而成,并灌有铅棒。其中薄钢板的作用是约束橡胶片的横向变形,提供竖向刚度;橡胶片的作用是提供需要的水平位移,降低水平刚度。该类型支座的减隔震机理^[3]是一方面利用铅屈服后的低刚度延长结构的周期,另一方面利用其滞后效应来消耗震动能量。铅芯橡胶支座的构造图见图1(a)。

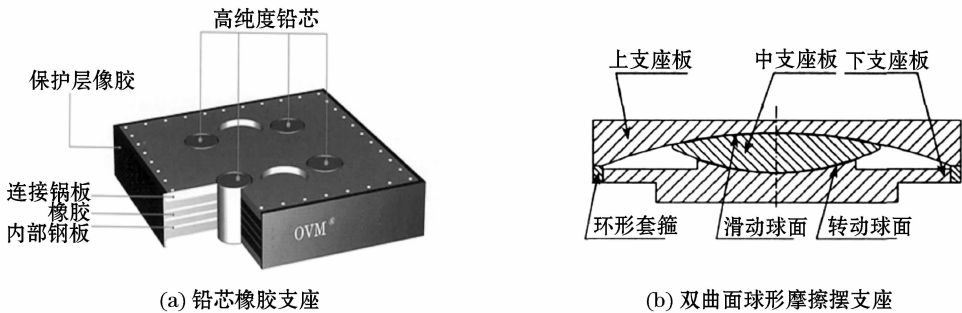


图1 铅芯橡胶支座和双曲面球形摩擦摆支座构造图

Fig. 1 Constructional drawing of lead plug rubber bearings and hyperbolic spherical friction pendulum isolation bearing

1.2 双曲面球形摩擦摆支座

双曲面球形摩擦摆支座(FPB)(以下简称“摩擦摆支座”)的工作原理见图1(b)所示:当地震力低于铅销的抗剪强度时,摩擦摆减隔震支座同普通支座;当地震力大于铅销的抗剪强度,结构以摩擦摆减隔震支座的周期振动。该支座在整个地震位移过程中,利用滑块和滑动面之间的摩擦耗能原理达到减震的效果^[4]。

2 减隔震支座动力参数的设计方法

有限元分析时,常用双线性模型^[5]表达铅芯橡胶支座与摩擦摆减隔震支座的本构关系,见下图2所示。双线性分析模型中的有关参数分别为:屈前刚度 K_1 、屈后刚度 K_2 和支座的屈服强度 Q_y 。

2.1 铅芯橡胶支座动力参数的设计方法

多数工程师往往是参照厂家的定型产品及参数来进行抗震设计,由于对过程与细节不了解,无法准确判定设计参数的合理性。笔者根据近几年的设计经验,以方形铅芯橡胶支座为例,将其设计流程详细归纳如下,以供设计参考^[6]:

(1)根据支座竖向承载力 N_{\max} 确定支座的平面尺寸 $a = \frac{N_{\max}}{[\sigma]}$,其中橡胶的容许应力 $[\sigma]$ 一般在8~12 MPa,为了控制支座尺寸大小,设计常取为11 MPa左右;

(2)由静力(主要为温度、预应力、收缩徐变)分析,确定支座的静力最大位移量 D_0 ;

(3)根据“制动力作用下橡胶剪切变形小于0.7”的规定,计算橡胶层总厚度 $\sum t_1 \geq \frac{D_0}{0.7}$;

(4)根据梁缝与伸缩缝设计需要,限定罕遇地震作用下支座的位移量 U_{be} ;

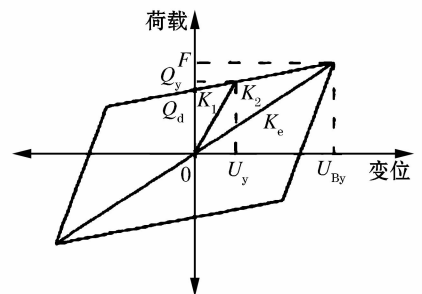


图2 减隔震支座动力分析的本构模型
Fig. 2 Constitutive model for dynamic analysis of isolation bearing

(5) 根据橡胶的最大允许剪应变 $r_{\max} = \frac{U_{be}}{\sum t}$ (支座稳定性要求 γ_{\max} 小于 2.5, 一般情况下建议取 1.75, 留有一定储备以适应地震的不确定性), 计算橡胶层厚度 $\sum t_2 \geq \frac{U_{be}}{\gamma_{\max}}$;

(6) 综合确定橡胶层厚度 $\sum t \geq \max(\sum t_1, \sum t_2)$;

(7) 根据桥梁用的橡胶支座的第一形状系数 $S_1 = \frac{a}{4t}$ (6 ~ 12 之间), 确定单层橡胶厚度 t 的范围为 $\frac{a}{48} \leq t \leq \frac{a}{24}$, 并计算计算橡胶层数 $n = \frac{\sum t}{t}$;

(8) 给定加劲钢板厚度 δ_0 (3 ~ 7mm), 计算支座总高度 $\delta = (n + 1)(\delta_0 + t)$;

(9) 给定单个铅棒直径 $\phi = \frac{\delta}{m}$ (支座高度与铅芯直径比 m 取值为 1.25 ~ 2.0);

(10) 计算 4 个铅棒面积, 加劲钢板面积 $A_L = \pi\phi^2$, 橡胶面积 ($A_g = (a - 20)^2$), 橡胶面积 A_r ($A_r = A_g - A_L$);

(11) 计算屈后刚度 K_2 :

$$K_2 = \frac{F - Q_d}{U_{be}} = \frac{A_r G \gamma_{\max} + A_L [q(\gamma_{\max}) - 8.5]}{\gamma_{\max} \times \sum t} \quad (1)$$

其中, 橡胶剪切模量一般 G 为 0.8 ~ 1.2MPa, 铅棒的剪应力 $q(\gamma)$ 一般可参照日本桥梁免震设计条例取值^[7]进行。

(12) 计算屈前刚度 K_1

$$K_1 = \alpha K_2 \quad (2)$$

式中, α 为屈前与屈后刚度的比值, 参照日本规范一般取 6.5。

(13) 由于铅芯橡胶支座属于非线性单元, 但静力分析、模态分析等均属于线性分析, 线性分析时因不能考虑非线性属性, 会给结构分析带来如几何可变问题等不稳定力学问题, 故须使用非线性单元的线性属性。根据等效线性化理论^[8], 得到非线性单元的线性属性, 其等效刚度 K_e 和等效阻尼比 ζ_e 分别如下:

$$K_e + K_2 + \frac{Q_d}{U_{be}} \quad (3)$$

$$\zeta_e = \frac{2Q_d \times [U_{be} + Q_d / (K_2 - K_1)]}{\pi U_{be} [Q_d + U_{be} K_2]} \quad (4)$$

式中, 铅棒屈服力为 $Q_d = 8.5A_L$, 支座屈服力 $Q_y = \frac{\alpha}{\alpha-1} Q_d$ 。

2.2 摩擦摆支座动力参数的设计方法

摩擦摆支座屈前刚度 K_1 、屈后刚度 K_2 和支座的屈服强度 Q_y 由下式确定:

$$K_1 = \frac{\mu W}{U_y}, K_2 = \frac{W}{H} \quad (5)$$

$$H = R_1 + R_2 - h_1 \quad (6)$$

式中, 摩擦系数 μ 一般取为 0.02 ~ 0.04; D_y 为摩擦摆支座屈服位移, 一般为 0.002 m; H 为两个球面的球心距, R_1 、 R_2 分别为上、下盖板曲面的半径, 一般取上下盖板半径相等, 即 $R_2 = R_1$, h_1 为中支座板的厚度。设计中最关注的问题是如何确定支座球心距大小, 其设计过程如下:

首先根据摩擦摆支座竖向承载及构造要求“ R_1 一般不小于普通球钢支座半径 R_0 的 1.8 倍, 且普通球钢支座的球面容许应力为 30MPa”, 可得该支座的最小球心距满足下式:

$$H_{\min} = 7.2 \sqrt{\frac{F}{3 \times 10^{-2} \pi}} \quad (F \text{ 为支座竖向承载力}) \quad (7)$$

然后应从满足桥墩及基础减震要求出发考虑, 估计出减隔震系统的周期 T , 按下式计算球心距的大小^[9]:

$$H = \frac{gT^2}{4\pi^2} \approx \frac{T^2}{4} \quad (8)$$

同样根据等效线性化理论^[10], 得到等效刚度 K_e 和等效阻尼比 ζ_e 分别如下:

$$K_e = \frac{W}{H} + \frac{\mu W}{U_{be}}, \xi_e = \frac{2\mu}{\pi(\mu + U_{be}/H)} \quad (9)$$

3 减隔震支座的实桥设计与隔震效果研究

3.1 动力计算模型

某 5×30 m 预应力混凝土连续箱梁桥,主梁重 308 kN/m,双柱式墩,每个墩上设两个支座,墩高 12 m,采用承台底六弹簧模型简化模拟桩土作用,动力有限元分析模型见下图 3 所示。场地为软土地场,特征周期 0.8 s,计算考虑 4 种工况,地震动峰值加速度分别为 0.1 g、 0.2 g、 0.3 g、 0.4 g,采用人工波进行非线性时程分析。为简化分析,假定每个墩上布置相同型号的支座,且每个墩上单个支座竖向承载力为 $6\,500$ kN(其中恒载反力为 $4\,600$ kN)。

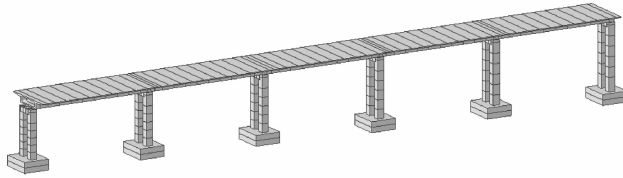


图 3 动力有限元分析模型

Fig. 3 Dynamic finite element analysis model

3.2 减隔震支座动力参数的设计

根据前述支座动力参数的设计方法,笔者设计了这两种支座。其中铅芯橡胶支座按照静力最大位移量的不同设计了 6 种规格支座,见表 1 所示;摩擦摆支座按支座半径与摩擦系数的不同设计了 6 种规格支座,见表 2 所示。

表 1 六种规格铅芯橡胶支座的设计参数

Table 1 Design parameters of six kinds specifications of LRB

项目	规格 1	规格 2	规格 3	规格 4	规格 5	规格 6	
细部构造参数	静力最大位移量/mm	50	75	100	125	150	175
	单层橡胶厚度 t_r /mm	20	20	20	20	22	22
	橡胶层数 n	4	6	7	9	10	12
	第一形状系数 S_1	10.9	10.9	10.9	10.9	9.9	9.9
	支座计算总高度 H /mm	135	189	216	270	319	377
	铅芯直径 D_p /mm	4Φ120	4Φ120	4Φ120	4Φ120	4Φ120	4Φ120
动力计算参数	Q_y /kN	385	385	385	385	385	385
	K_1 /(kN·m ⁻¹)	4.76E+04	3.18E+04	2.38E+04	1.91E+04	1.59E+04	1.36E+04
	K_2 /(kN·m ⁻¹)	7.14E+03	4.76E+03	3.57E+03	2.86E+03	2.38E+03	2.09E+03
	等效刚度 K_b /(kN·m ⁻¹)	1.04E+04	6.94E+03	5.20E+03	4.16E+03	3.47E+03	2.97E+03
	等效阻尼比 ζ_b	0.174	0.174	0.174	0.174	0.174	0.174

注:上表中支座的平面尺寸为 $870\text{mm} \times 870\text{mm}$,单层钢板厚度为 7mm 。

表 2 6 种规格摩擦摆减隔震支座的设计参数

Table 2 Design parameters of six kinds specifications of FPB

项目	规格 1	规格 2	规格 3	规格 4	规格 5	规格 6
摩擦系数 μ	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
球心距 H /m	2.0	2.5	3.0	2.0	2.5	3.0
最大压应力/MPa	26.8	17.2	11.9	26.8	17.2	11.9
Q_y /kN	138	138	138	184	184	184
K_1 /(kN·m ⁻¹)	69 000	69 000	69 000	92 000	92 000	92 000
K_2 /(kN·m ⁻¹)	2 300	1 840	1 533	2 300	1 840	1 533
等效刚度 K_b /(kN·m ⁻¹)	2 990	2 530	2 223	3 220	2 760	2 453
等效阻尼比 ζ_b	0.15	0.17	0.20	0.18	0.21	0.24

3.3 减隔震支座动力参数敏感性分析

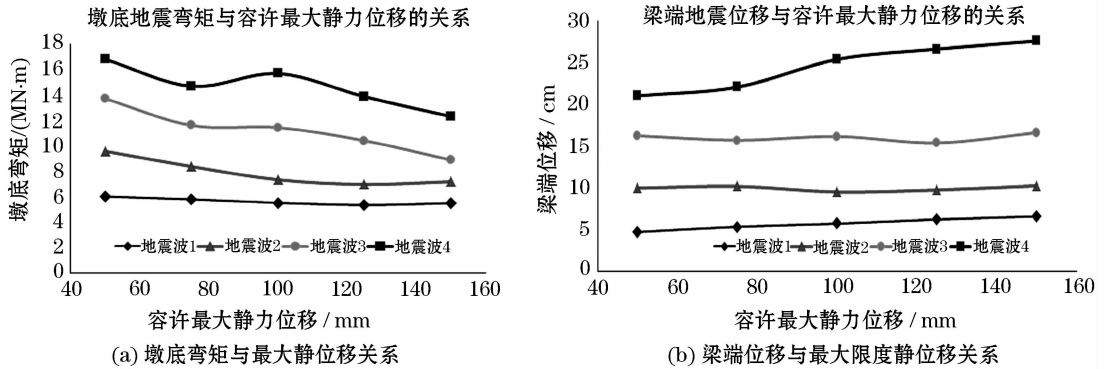


图 4 不同地震作用下结构地震响应与铅芯支座最大静位移的关系

Fig. 4 Relationship between structural seismic response and maximum static displacement of LRB under different seismic action

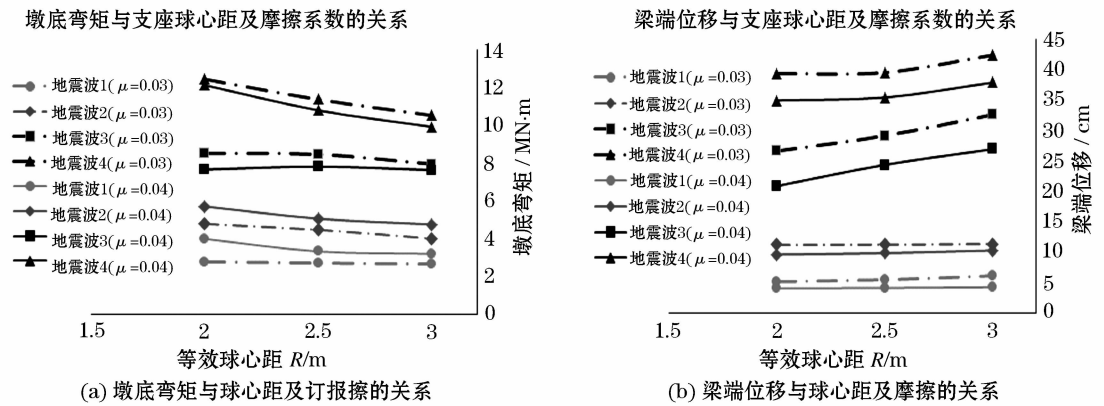


图 5 不同地震作用下结构地震响应与摩擦摆支座球心距及摩擦系数的关系

Fig. 5 Relationship between structural seismic response and spherical center distance of FPB/friction coefficient under different seismic action

从图中可见:

(1)随着铅芯支座容许最大静位移(决定橡胶厚度)的增加,桥墩地震内力响应呈逐渐减小趋势,梁端位移逐渐增大,故设计主要是处理好内力与位移的矛盾关系。设计时一般以刚度为首要原则先确定橡胶层厚度以适应墩柱内力需求,然后通过调整铅芯直径(即改变阻尼大小)以适应梁端位移需求。

(2)随着摩擦摆支座球心距的增大,桥墩地震内力响应减小,故增大球心距对减轻地震作用是有利的;当地震作用较大时(峰值加速度 > 0.2g)增大摩擦系数,则桥墩地震内力响应减小,但当地震作用较小时(峰值加速度 < 0.2g)增大摩擦系数,则桥墩地震内力响应反而增大,可见支座摩擦系数并不是越大越有利,应通过分析确定。

(3)随着摩擦摆支座球心距的增大,梁端位移增大;而增大支座的摩擦系数,则梁端位移减小。因此,减小梁端位移的途径可通过设计小半径、大摩擦的支座参数来实现。

3.4 减隔震效果差异的对比

根据时程分析结果,对设计的 6 种规格铅芯与摩擦摆支座的减隔震效果做了对比分析,见下表 3 所示:

表 3 铅芯与摩擦摆支座的减隔震效果对比分析

Table 3 Comparative analysis of seismic isolation effect between LRB And FPB

地震动输入	桥墩弯矩均值/(kN·m)			梁端位移均值/cm		
	摩擦摆支座 M1	铅芯支座 M2	M2/M1	摩擦摆支座 S1	铅芯支座 S2	S2/S1
地震波 1(A=0.1g)	3 189	5 630	1.77	4.85	4.70	0.97
地震波 2(A=0.2g)	4 793	7 764	1.62	10.58	10.15	0.96
地震波 3(A=0.3g)	8 006	10 789	1.35	26.77	17.67	0.66
地震波 4(A=0.4g)	11 268	14 070	1.25	38.29	22.97	0.60

从上表可见:(1)当地震作用较小时,采用铅芯支座的桥墩弯矩响应较摩擦摆支座大62%~77%左右,而位移差别较小,故此时选用摩擦摆支座相对较优;(2)随着地震作用的提高,两者的内力响应差别逐渐减小至25%左右,而位移响应差别逐渐增大,可达40%左右;由于大震作用下中小跨度桥梁的梁端位移往往起控制作用(因梁缝及伸缩缝设计困难),故此时选用铅芯支座更合适。

3.5 减隔震效果差异的原因分析

为什么地震作用越大,摩擦摆支座比铅芯支座的产生的变位越大,计算结果是否仅仅只是一种偶然?设计时不少工程师对此产生了质疑,为此笔者借助等效线性化理论,简要分析如下。

根据式(3)可知,铅芯橡胶支座的等效刚度:

$$K_{e\text{铅}} = K_{2\text{船}} + (\alpha - 1)K_{2\text{船}} \frac{U_u}{U_{be}} \quad (10)$$

根据式(5)与式(9)可知,摩擦摆支座的等效刚度:

$$K_{e\text{摆}} = \frac{W}{H} + \frac{\mu W}{U_{be}} = k_{2\text{摆}} \left(1 + \frac{H\mu}{U_{be}}\right) \quad (11)$$

联立上面两式可得:

$$\frac{K_{e\text{摆}}}{K_{2\text{船}}} = \frac{K_{2\text{摆}} \left(1 + \frac{H\mu}{U_{be}}\right)}{K_{2\text{船}} \left[1 + 5.5 \frac{U_y}{U_{be}}\right]} < 1 \quad (12)$$

一般情况下,由于 $H\mu > 5.5U_y = 0.011\text{m}$,故 $\partial \frac{K_{e\text{摆}}}{K_{e\text{铅}}} < 0$ 。因此,随着地震作用的增加,摩擦摆与铅芯支座的

的等效刚度的差别会越来越大,故从非线性问题的等效线性化(等效为弹簧与阻尼器的并联系统)理论角度看,在两种支座的等效阻尼比差别不大的情况下,等效刚度差别越大从而导致支座的变位差别也越大。

4 结论

根据设计经验,本文归纳总结了铅芯橡胶与双曲面球形摩擦摆支座动力参数的详细设计方法,并对两种支座动力参数的敏感性、减隔震效果差异及相关原因做了分析,结论如下:

(1)随着铅芯支座容许最大静位移的增加,桥墩地震内力响应呈逐渐减小趋势,梁端位移呈逐渐增大趋势;

(2)随着摩擦摆支座球心距的增大,则桥墩地震内力响应减小,而梁端位移会逐渐增大;随着摩擦摆支座摩擦系数的增大,梁端位移会逐渐减小,而桥墩内力响应还与地震作用大小有关,故摩擦系数并不是越大越有利,应通过分析确定;

(3)随着地震作用的提高,采用铅芯橡胶与摩擦摆支座的桥墩内力响应差别将逐渐减小,而梁端位移响应差别逐渐增大,最高可达40%左右;

(4)铅芯橡胶与摩擦摆支座位移响应差别大的原因可借助等效线性化理论来解释,即随着地震作用的增加,摩擦摆与铅芯支座的等效刚度的差别会越来越大,故两者的变位差别也越大。因此,在高烈度地震区的中小跨度桥梁而言,选用铅芯支座更易满足梁端位移设计要求。

参考文献

- [1] 燕斌. 铅芯橡胶支座与液体粘滞阻尼器耦合分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(6): 69-73.
YAN Bin. Coupling analysis of lead rubber bearing and liquid viscous damper[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2012, 34(6): 69-73. (in Chinese)
- [2] 吴彬, 庄军生. 铅芯橡胶支座力学性能及其在桥梁工程中的应用研究[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(4): 138-140.
WU Bing, ZHUANG Junsheng. Study on mechanical characteristics of lead-rubber bearing and its application for shock reduction/isolation in bridge engineering[J]. China Railway Sciences, 2004, 25(4): 138-140. (in Chinese)
- [3] 国祥明, 肖盛燮. 对桥梁两种橡胶支座减隔震性能的理论分析[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(5): 24-27.

- GUO Xiangming, XIAO Shengxie. The theory analysis of two kinds of bridge rubber bearing for isolated function[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2006,25(5):24-27. (in Chinese)
- [4] 焦驰宇,胡世德,管仲国. FPS 抗震支座分析模型比较研究[J]. 振动与冲击,2007,26(10):113-117.
JIAO Chiyu, HU Shide, GUAN Zhongguo. Comparison study on analysis models of FPS seismic isolation support[J]. Journal of Vibration and Shock,2007, 26(10):113-117. (in Chinese)
- [5] 原媛,李汝庚,石琼辉. 铅芯橡胶支座的双线型模型研究[J]. 广州大学学报(自然科学版),2005,4(3):272-276.
YUAN Yuan, LI Rugeng, SHI Qionghui. Study on bilinear model of lead rubber isolating bearing[J]. Journal of Guangzhou University:Natural Science Edition,2005,4(3):272-276. (in Chinese)
- [6] 何友娣,阮怀圣,李龙安. 桥梁结构减隔震设计与应用研究报告[R]. 武汉:中铁大桥勘测设计院集团有限公司,2011.
HE Youdi, RUAN Huaisheng, LI Longan. Study report of bridge structure seismic isolation design and application[R]. Wuhan: China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co.,Ltd.,2011. (in Chinese)
- [7] 范立础,王志强. 桥梁减隔震设计[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
FAN Lichu, WANG Zhiqiang. Bridge Seismic Isolation Design[M]. Beijing:China Communications Press, 2001. (in Chinese)
- [8] 朱东生,劳远昌,沈大元,等. 隔震桥梁设计参数的研究[J]. 土木工程学报. 2000,33(5):52-56
ZHU Dongsheng, LAO Yuanchang, SHEN Dayuan, et al. Research on some design parameters of seismically isolated bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2000,33(5):52-56. (in Chinese)
- [9] 彭天波,李建中,范立础. 双曲面球形减隔震支座的开发及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版),2007,35(2):176:180.
PENG Tianbo, LI Jianzhong, FAN Lichu. Development and application of double spherical aseismic bearing[J]. Journal of Tongji University:Natural Science, 2007,35(2):176-180. (in Chinese)
- [10] 王建强,王利娟. 铅芯叠层橡胶支座恢复力模型研究[J]. 世界地震工程,2005,21(2):151-154.
WANG Jianqiang, WANG Lijuan. Study on restoring force model of a lead rubber bearing[J]. World Earthquake Engineering,2005,21(2):151-154. (in Chinese)