

彭文礼,季日臣.摩擦摆支座在矮塔斜拉桥中减震效果研究[J].地震工程学报,2021,43(1):213-218.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.213

PENG Wenli,JI Richen.Vibration Reduction Effect of Friction Pendulum Bearings in Low-tower Cable-stayed Bridges[J].China Earthquake Engineering Journal,2021,43(1):213-218.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.213

摩擦摆支座在矮塔斜拉桥中减震效果研究

彭文礼,季日臣

(兰州交通大学 土木工程系,甘肃 兰州 730070)

摘要:矮塔斜拉桥有着良好的受力性能与美观性能,因此抗震设计对矮塔斜拉桥至关重要。摩擦摆式减隔震设计能够将桥梁上部结构与下部结构分离,从而延长结构的自振周期和摩擦耗能机理来降低和耗散传递到桥梁上部结构的能力。本文以靖远金滩黄河大桥(100+168+100) m 矮塔斜拉桥为分析模型,利用摩擦摆式减隔震支座对矮塔斜拉桥的墩身进行减隔震研究,运用 MIDAS 有限元软件输入不同的地震波以检验摩擦摆系统的减震效果。分析结果证明了在矮塔斜拉桥中应用摩擦摆减隔震支座系统的有效性。

关键词:矮塔斜拉桥;摩擦摆式支座;地震波;减震效果

中图分类号: U447

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)01-0213-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.213

Vibration Reduction Effect of Friction Pendulum Bearings in Low-tower Cable-stayed Bridges

PENG Wenli, JI Richen

(Department of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Earthquake is a natural disaster phenomenon. The low-tower cable-stayed bridge, for its good mechanical and aesthetic performance, has been widely used in recent years. Therefore, seismic design is very important for low-tower cable-stayed bridges. The friction pendulum system can separate the superstructure from the substructure of bridge, thus extending the natural vibration period and friction energy dissipation of the structure, reducing and dissipating the energy transferred to the superstructure of the bridge. In this paper, the low-tower cable-stayed bridge in Jintan Yellow River Bridge of Jingyuan was taken as the analysis model, and the friction pendulum bearing was used to study the seismic isolation effect of the pier body of low-tower cable-stayed bridge. Different seismic waves were input to test the damping effect of the friction pendulum system by using the Midas finite element software. The analysis results showed that the application of friction pendulum bearing system in low-tower cable-stayed bridge is ef-

收稿日期:2019-08-27

基金项目:国家自然科学基金(52068041)

第一作者简介:彭文礼(1991-),男,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为桥梁与隧道工程。E-mail:774072742@qq.com。

通信作者:季日臣(1969-),男,山西朔州人,教授,研究方向为桥梁工程。E-mail:1165251533@qq.com。

fective.

Keywords: low-tower cable-stayed bridge; friction pendulum bearing; seismic wave; damping effect

0 引言

地震是一种自然灾害现象,给人类带来的灾难很大,抵御地震成为人类防御灾害的长期工作。为了减轻地震的影响,就需要对地震有较深入的了解。因此我们要掌握工程结构抗震设计原理和方法,研究如何防止或减少建筑物的地震破坏,通过对建筑物的抗震设防,将地震造成的人员伤亡和经济损失降到最低限度^[1-2]。矮塔斜拉桥有着良好的受力性能与美观性能,近年来得到广泛应用,摩擦摆式减隔震支座关键是将桥梁上部结构与下部结构分离,从而延长结构的自振周期和摩擦耗能机理来降低和耗散传递到桥梁上部结构的能力。

文献[2]主要研究了结构地震反应与抗震验算,指出了桥梁延性抗震设计。文献[3]主要进行了桥梁抗震的计算与抗震性能评述。文献[4-5]主要研究了摩擦摆式支座在桥梁中的应用,未研究矮塔斜拉桥中的应用。文献[6]研究了桥梁抗震设计的理论与方法。文献[7-8]研究了隔震装置的技术发展,如普通橡胶支座,高阻尼橡胶支座,铅芯橡胶支座以及摩擦摆式隔震支座,对于具体隔震效果分析未进行深入研究。我国对斜拉桥的抗震研究较早,文献[9]采用反应谱法对天津永和桥进行了地震反应分析,并研究了行波效应的影响。文献[10]指出对斜拉桥地震波分量独立作用、共同作用下的地震反应对比分析,结果表明行波效应的影响与斜拉桥的结构形式和地震波的传播速度有关。文献[11]指出摩擦摆支座是 Zayas 在 1985 年开发出来的,其具有良好的隔振效果,而且工作性能也比较稳定,近年来在我国得到了广泛的应用,如苏通大桥、上海长江大桥以及港珠澳大桥等重点工程。

综上所述,矮塔斜拉桥减震研究以及摩擦摆支座在桥梁应用的研究都很多,但是在矮塔斜拉桥中摩擦摆式支座的减震效果的研究很少,因此对比分析摩擦摆式支座的减震效果研究很有必要。本文以清远金滩黄河大桥(100+168+100) m 为例,通过数值分析探讨了摩擦摆式支座在矮塔斜拉桥中的减震效果。

1 摩擦摆式支座的介绍

1.1 摩擦摆式支座简介

摩擦摆隔震支座是另一种有效的摩擦滑移隔震体系,1985 年由美国的 Dr.Victor Zayas 首先提出。由于其具有良好的工作性质,国内外学者进行了较深入的研究,并已被成功应用于实际工程中。FPS 隔震支座是利用弧形滑动面的周期来延长结构物的振动周期,大幅度减少结构物因受地震作用而引起的放大效应。此外,还可以利用 FPS 滑动面与滑块之间的摩擦来达到消耗地震能量、减少地震力输入的目的。FPS 摩擦摆滑动隔震的方法造价低、施工简单、不受上部结构重量影响,除具有一般平面滑动隔震系统的特点外,还具有良好的稳定性、自复位功能和抗平扭能力。目前,FPS 摩擦摆已在外国建筑中得到了广泛的应用,尤其在美国,采用 FPS 摩擦摆隔震系统的建筑物已达数百座。^[2]

1.2 摩擦摆式支座工作原理

桥跨结构中的抗震理论基本上都是选取各类减震的体系,结构物在来回发生运动的过程中,摩擦摆式支座的滑动面和滑块之间将会出现摩阻力来抵消一大部分地震作用的能量,从而降低地震的破坏作用^[3],其工作原理如图 1 所示,利用减震体系本身的滞回特性来消耗地震波的输入能量,以达到地震力对下部构造影响减弱的目的^[4]。摩擦摆支座的承载能力高、施工简单,而且造价又低,除了有一般的平面滑动隔震系统的特点之外,其还具有良好的稳定性、复位功能以及抗平扭能力^[5-6],其构造示意图如图 2 所示。

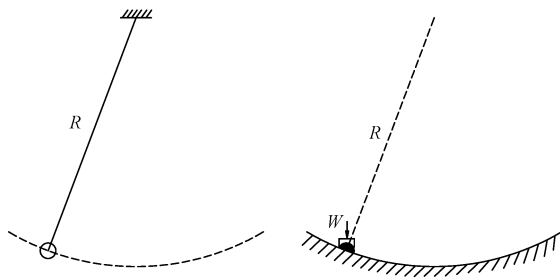


图 1 单摆工作原理

Fig.1 Pendulum principle

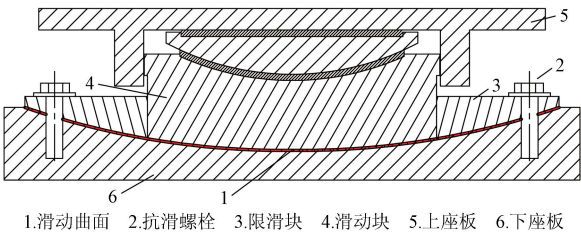


图 2 摩擦摆支座构造

Fig.2 FPB structure

根据能量守恒原理,传统抗震结构:

$$E_{in}=E_R+E_D+E_S$$

(1)

消能减震结构

$$E_{in}=E_R+E_D+E_S+E_A$$

(2)

式中: E_{in} 为地震发生时输入结构的全部能量; E_R 为结构做出对地震反应的能量,包括结构的动能和势能; E_D 为结构体本身阻尼部分抵消的能量($\leq 5\%$); E_S 为主要构件的塑性变形甚至损坏所抵消的能量; E_A 为摩擦摆抵消的能量^[7]。

2 工程背景及有限元模型参数确定

靖远金滩黄河大桥主桥结构为预应力混凝土矮塔斜拉桥,全长 368 m,跨径布置为(100+168+

100) m。主桥箱梁采用单箱五室斜腹板断面,顶板宽度为 36.5 m,主桥通过箱梁顶结构找坡,箱梁中支点外缘梁高 6.8 m,跨中及边跨合拢段箱梁外缘梁高为 3.3 m,箱梁底板下缘按 1.8 次抛物线变化。

桥塔外形采用 A 型,总高 30 m,桥塔截面为实心矩形截面,桥塔横向宽度为 2.4 m,顺桥向为变宽度。下塔柱截面为 240 cm×240 cm,上塔柱(锚索区)顺向宽度从 541 cm 变化至 300 cm。

主桥桥墩支座布置如图 3 所示,从左至右分别为 6~9 号墩,其中 7、8 号主墩位于主河槽内。桥墩采用横桥向设置三支实体墩身;中肢 5 m×7 m 矩形截面,边肢 5 m×4 m 矩形截面。墩身下接承台,承台尺寸为 15.7 m×33.7 m×5 m。承台底布置 18 根直径 2.2 m 的桩基础,桩长 60 m。主桥 6、9 号过渡墩采用横桥向设置三支实体墩身,墩身为 2 m×4 m 矩形截面,墩身下设置承台,承台尺寸为 8 m×28 m×3 m。承台底布置 12 根直径 1.8 m 的桩基础,桩长为 35 m。场地土类型为中硬土,场地类别为Ⅱ类。根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015),场址区地震动峰值加速度为 0.2 g,相应的地震烈度为Ⅷ度,地震动加速度反应谱特征周期为 0.45 s。

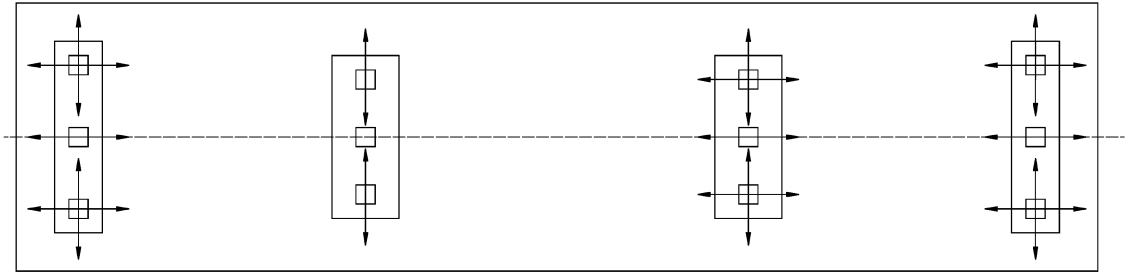


图 3 靖远金滩黄河大桥矮塔斜拉桥桥墩支座布置图

Fig.3 Layout of pier bearings of the low-tower cable-stayed bridge in Jintan Yellow River Bridge of Jingyuan

全桥模型共 3 591 个节点,单元 3 492 个,其中梁单元 3 444 个,只受拉单元 48 个。模拟结构的摩擦摆式支座参数为:位移速度较慢时的摩擦系数为 0.05,位移速度较快时摩擦系数为 0.03,主墩支座摩擦面曲率半径为 9 m,过渡墩支座摩擦面曲率半径为 5 m,减隔震位移为 300 mm。靖远金滩黄河大桥矮塔斜拉桥的有限元模型如图 4 所示。

3 减震结构与原结构动力特性对比分析

3.1 自振频率对比分析

地震波的周期与频率成反比关系,其频率大小可以直接的反应减震效果的有效性。减震模型的频率减小就说明周期增大,说明减震模型的桥梁进行

减震是可行的。表 1 是减震结构与原结构的前二十阶频率对比的情况。

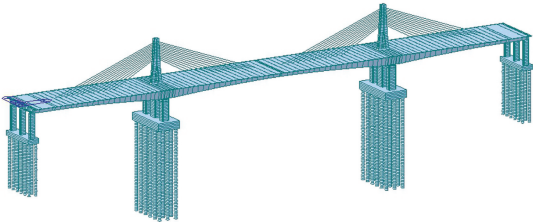


图 4 靖远金滩黄河大桥矮塔斜拉桥有限元模型

Fig.4 Finite element model of the low-tower cable-stayed bridge in Jintan Yellow River Bridge of Jingyuan

限于篇幅,本文只附了前 3 阶的模态图(图 5~7),任一阶态的频率列于表 1。通过表 1 可以发现:当为第一阶时,原来模型的频率为 1.011 1,减震模

型的频率为 0.555 1,延长周期 0.812 s,有明显的减震效果;当为第五阶时,原来模型的频率为1.928 7,减震模型的频率为 1.174 4,延长周期0.333 s;当为第十阶时,原来模型的频率为 2.473 3,减震模型的频率为 2.178 0,延长周期 0.055 s;当为第十五阶时,

原来模型的频率为 4.642 7,减震模型的频率为 3.978 8,延长周期0.036 s;当为第二十阶时,原来模型的频率为6.420 7,减震模型的频率为4.093 1,延长周期0.089 s。任何一阶的频率增大,周期都有所减小,说明减震结构的地震反应都有所减小。

表 1 减震结构与原结构前二十阶自振频率

Table 1 The first twenty natural frequencies of vibration-absorbing structures and original structures

阶数	频率/Hz		延长周期 /s	阶数	频率/Hz		延长周期 /s
	减震结构	原结构			减震结构	原结构	
1	0.555 1	1.011 1	0.812	11	2.736 5	3.150 0	0.048
2	0.814 1	1.222 5	0.410	12	3.284 2	3.561 1	0.024
3	1.116 0	1.552 5	0.252	13	3.932 6	4.567 1	0.035
4	1.124 4	1.722 3	0.309	14	3.938 2	4.587 9	0.036
5	1.174 4	1.928 7	0.333	15	3.978 8	4.642 7	0.036
6	1.317 4	1.955 4	0.248	16	3.989 6	4.889 0	0.046
7	1.537 6	2.001 0	0.151	17	4.014 2	5.446 1	0.065
8	1.924 0	2.047 7	0.031	18	4.049 5	6.063 0	0.082
9	1.986 0	2.075 8	0.022	19	4.049 6	6.076 6	0.082
10	2.178 0	2.473 3	0.055	20	4.093 1	6.420 7	0.089

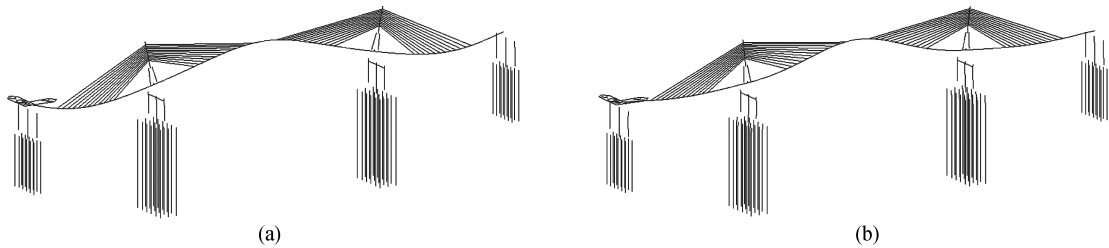


图 5 减隔震与普通支座主梁纵飘十一阶对称竖弯图

Fig.5 Longitudinal floating and first-mode symmetrical longitudinal bending of the main girder with seismic isolation and ordinary bearings

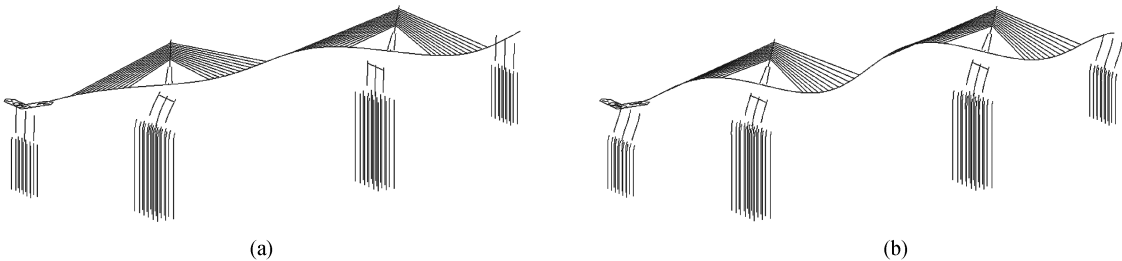


图 6 减隔震与普通支座主梁纵飘十二阶反对称竖弯图

Fig.6 Longitudinal floating and second-mode anti-symmetrical longitudinal bending of the main girder with seismic isolation and ordinary bearings

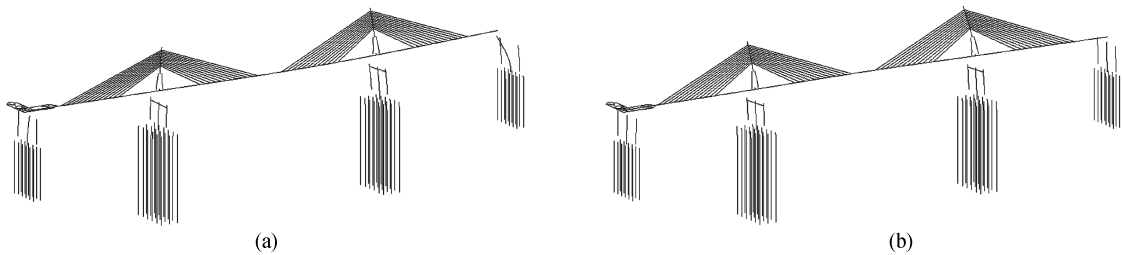


图 7 减隔震与普通支座主梁三阶对称侧弯图

Fig.7 Longitudinal floating and third-mode symmetrical longitudinal bending of the main girder with seismic isolation and ordinary bearings

3.2 减震性能对比分析

3.2.1 地震波输入

地震波根据地震动参数选取 Elcent 波、Taft 波及 Sanfer 波三条地震波,地面加速度分别为横桥向与纵桥向同时输入地震波。其波形时程函数图如图 8~10。

3.2.2 墩顶、墩底、桩基减震性能比较

为了便于比较,现将靖远金滩黄河大桥在摩擦摆式减隔震支座的作用下将 8 号墩顺桥向中肢墩顶的位移,以及 8 号墩中肢墩底的剪力与弯矩的减震率列于表2。采用摩擦摆支座的减隔震结构墩顶位

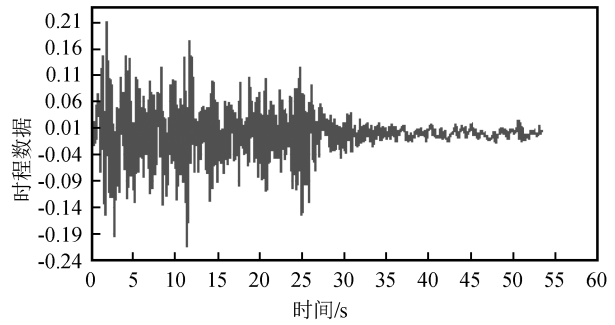


图 8 Elcent 波时程函数图

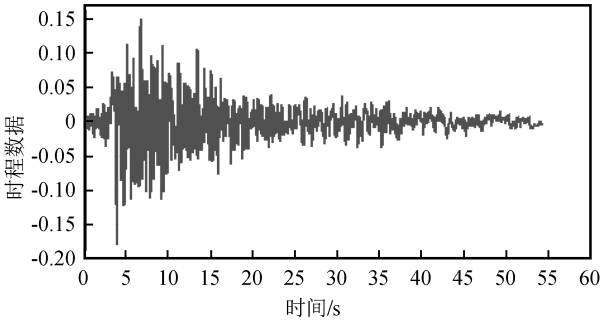


图 9 Taft 波时程函数图

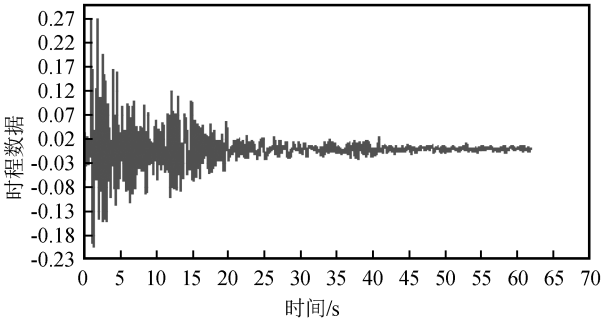


图 10 Sanfer 波时程函数图

Fig.10 Time history function of Sanfer wave

移明显减小,墩身内力也明显减小,隔震率均在 70%以上,本文定义减震率如下式所示:

减震率=
$$\frac{\text{原结构的地震反应}-\text{有减震支座时的地震反应}}{\text{原结构的地震反应}} \times 100\%。$$

表 2 减震结构与原结构在地震波的影响下的减震效果

Table 2 Seismic absorption effect of damping structures and original structures under the influence of seismic waves		地震波 1	地震波 2	地震波 3
项目				
顺桥向 8#墩顶位移/mm	原结构	40.9	27.8	43.1
	减震结构	10.6	7.8	7.9
	减震率	74.1%	71.9%	81.7%
横桥向 8#墩顶位移/mm	原结构	51.6	22.1	18.3
	减震结构	9.3	3.9	4.6
	减震率	82.0%	82.4%	74.9%
顺桥向 8#墩中肢墩底弯矩/kNm	原结构	1 079 388	771 077.7	1 143 327.2
	减震结构	229 626.5	170 010.9	173 962.2
	减震率	78.7%	78.0%	84.8%
横桥向 8#墩中肢墩底弯矩/kNm	原结构	4 614 911.3	1 958 446	1 631 980
	减震结构	550 366.5	235 867	268 855.2
	减震率	88.1%	88.0%	83.5%
顺桥向 8#墩中肢墩底剪力/kN	原结构	107 406.1	84 743.4	114 756.3
	减震结构	24 112	18 709.3	21 081.3
	减震率	77.6%	77.9%	81.6%
横桥向 8#墩中肢墩底剪力/kN	原结构	156 908.3	69 686.6	57 627.2
	减震结构	31 540.9	11 437	15 676.4
	减震率	79.9%	83.6%	72.8%

对比以上结果可以得出以下结论:
在地震作用下,摩擦摆式支座对桥梁下部结构

有明显的减震效果,隔震率在 70%以上。采用摩擦摆支座的隔震结构墩底的内力远小于非隔震结构的

墩底内力,并且采用摩擦摆支座的隔震结构墩顶位移远小于非隔震结构的墩顶位移。桥墩的地震力一部分来自梁体传来的地震力,另一部分是桥墩本身所受的地震力,在摩擦摆式支座的作用下,梁体与桥墩发生了动力的相互作用,削弱了地震的作用,合理的配置摩擦摆式支座可以有效地利用桥梁体系各部分的动力相互作用。

4 结 语

摩擦摆式支座可以将桥梁上部结构与下部结构分开,进而抵消掉大量的地震波能量,降低结构的地震反应。桥墩是桥梁的主要受力构件,摩擦摆支座可使墩身内力大大减小,从而使矮塔斜拉桥受力良好。设计桥梁结构的摩擦摆式支座减隔震的系统时,应该从多种内力出发分别进行研讨,以能够正确的判断减震的幅度,从而最大程度的实现减震的效果。

参考文献(References)

- [1] 袁增嵘,肖建春,廖德,等.地震作用下超高大悬挑雕塑的抗倾覆分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2019,36(1):94-100.
YUAN Zengrong,XIAO Jianchun,LIAO De,et al.Anti-Overturning Analysis of Super Tall Cantilevered Sculpture under Earthquake Action[J].Journal of Guizhou University (Natural Science),2019,36(1):94-100.
- [2] 王显利.工程结构抗震设计[M].北京:机械工业出版社,2015.
WANG Xianli.Aseismic Design of Engineering Structures[M].Beijing:China Machine Press,2015.
- [3] 王克海,李茜.桥梁抗震的研究进展[J].工程力学,2007,24(增刊2):75-82,128.
WANG Kehai,LI Qian.Research Progress on Aseismic Design of Bridges[J].Engineering Mechanics,2007,24(Supp2):75-82,128.

- [4] 郭俊伟.摩擦摆减隔震支座在高烈度区高架桥的减震效果分析[J].城市道桥与防洪,2013(4):187-190.
GUO Junwei.Analysis on Damping Effect of Friction Pendulum Bearings(FPB) for Elevated Bridge in High Earthquake Intensity Region[J].Urban Roads Bridges & Flood Control,2013(4):187-190.
- [5] 杨允表.摩擦摆支座在桥梁抗震设计中的应用[J].中国市政工程,2014(5):88-91.
YANG Yunbiao.Application of Friction Pendulum Bearing (FPB) in Bridge Aseismatic Design[J].China Municipal Engineering,2014(5):88-91.
- [6] 范立础,王志强.我国桥梁隔震技术的应用[J].振动工程学报,1999(1):26-34.
FAN Lichu,WANG Zhiqiang.Application of Seismic Isolation Technology for Bridges in China[J].Journal of Vibration Engineering,1999(1):26-34.
- [7] 薛彦涛,常兆中,高杰.隔震建筑设计指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.
XUE Yantao,CHANG Zhaozhong,GAO Jie.Design Guide of Isolation Building [M]. Beijing: China Construction Industry Press,2016.
- [8] 李宏男.地震工程学[M].北京:机械工业出版社,2013.
LI Hongnan.Earthquake Engineering [M]. Beijing: China Machine Press,2013.
- [9] 项海帆.斜拉桥在行波效应作用下的地震反应分析[J].同济大学学报,1983,11(3):24-27.
XIUANG Haifan.Seismic Response Analysis of Cable-stayed Bridge under Traveling Wave Effect[J].Journal of Tongji University,1983,11(3):24-27.
- [10] 陈幼平,周宏业.斜拉桥地震反应的行波效应[J].土木工程学报,1996,29(6):61-68.
CHEN Youping,ZHOU Hongye .Seismic Behavior of Gable-stayed Bridges under Travelling Wave Excitation[J].China Civil Engineering Journal,1996,29(6):61-68.
- [11] ZAYAS V A,LOW S S,MAHIN S A.A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation [J]. Earthquake Spectra,1990,6(2):317-333.