

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2018.04.003

强震作用下独塔斜拉桥抗震性能分析

程怡

(阳光学院 土木工程学院,福建 福州,350015)

摘要:以某跨径为 110 m 的独塔异形斜拉桥为工程背景,通过非线性有限元分析对斜拉桥在强震作用下的地震响应特性及减震措施进行了研究,得出如下结论:相比 Lander-amboy 波,卓越周期与桥梁固有周期较为接近的 Cerro Prieto 波能够引起结构较大的地震响应。行波效应能够显著增大工程背景斜拉桥的地震响应,且随着视波速的增大,桥梁的加速度响应明显增大。阻尼系数 25 000 kN·s/m 为工程背景斜拉桥的最优粘滞阻尼器设计参数,且在塔梁连接处安装该参数粘滞阻尼器后,斜拉桥减震效果显著,尤其能明显减小结构的位移响应。

关键词:独塔斜拉桥;地震响应;有限元分析;粘滞阻尼器

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

文章编号:1672-4348(2018)04-0320-06

Seismic performance analysis of single-tower cable-stayed bridge under strong earthquake excitation

CHENG Yi

(College of Civil Engineering, Yango University, Fuzhou 350015, China)

Abstract: A single-tower cable-stayed bridge with a span of 110m was selected as the sample of the required engineering background. Based on the finite element analysis, the seismic response characteristics and damping measures of cable-stayed bridges were studied. Results show that compared with the Lander-amboy wave, the Cerro Prieto wave with its predominant period similar to that of the bridge's natural period, can cause a larger seismic response of the structure. The travelling wave effect can significantly increase the seismic response of the cable-stayed bridge, and the acceleration response of the bridge increased when the apparent wave velocity was increased. The optimum viscous damper design parameter for the cable-stayed bridge is 25 000 kN·s/m. Installing viscous dampers designed with such parameters at the connection points of the tower's beams produced remarkable damping effects for the bridge, with the displacement responses of the structure reduced most obviously.

Keywords: single-tower cable-stayed bridge; seismic response; finite element analysis; viscous damper

斜拉桥因其强大的跨越能力及美观造型成为应用广泛的桥型^[1-2]。伴随着斜拉桥的发展,其抗震问题也越来越凸显,尤其是如何确保其“大震不倒”或者“大震可修”成为人们关注的焦点。从既有的斜拉桥震害来看,地震作用下斜拉桥还未发生完全倒塌的现象,但局部构件的破坏时有发生

(拉索、支座、主梁),对桥梁的正常运营造成影响。面对随时可能发生的强震,如何减少斜拉桥发生损伤的危险成为桥梁工作者主要的目标。龙晓鸿^[3]、邵长江^[4]、魏德敏^[5]等均以在役斜拉桥为例,通过数值分析研究了斜拉桥的地震相应特性。范立础^[6]、叶爱君^[7]、徐秀丽^[8]等对斜拉

桥的减震措施进行了研究,表明在斜拉桥的地震响应分析时,非一致激励更能准确地进行斜拉桥的地震响应分析,同时,安装粘滞阻尼器对于斜拉桥的减震效果较为明显。但既有研究同时也表明,不同类型的斜拉桥其地震响应特性及相适应的减震方式也有着较大的异同,特别是对于结构选型更为多样化的异形斜拉桥来说,其抗震分析显得更为缺乏^[9]。

本文以某跨径为 110 m 的独塔异型斜拉桥为工程背景,建立有限元模型对其进行地震响应分析,考虑行波效应的影响,揭示其独塔异形斜拉桥的地震响应特性,并基于粘滞阻尼器对该斜拉桥的减震措施进行探讨。为其他同类独塔异形斜拉桥的抗震设计提供借鉴作用。

1 工程背景

某独塔斜拉桥,全长 453.0 m,跨径布置为

50+60+110+110+60+50 m。桥面总宽 29.5 m ((2.5 m(人行道)+9.75 m(行车道)+5.0 m(分隔带)+9.75 m(行车道)+2.5 m(人行道))。为半漂浮体系斜拉桥。桥面纵向西岸设置 2.2%纵坡,东岸设置 2.4%纵坡。全桥桥面连续,在两侧桥台设置伸缩缝。主桥采用钢拱塔斜拉桥结构形式,主梁为预应力钢筋混凝土连续箱梁,箱梁断面为单箱 4 室,梁底宽 14 m,梁顶宽 29.5 m,梁高 3.0 m。主塔采用等腰梯形闭合截面钢箱拱结构,塔高 82.2 m,截面高度 3.6 m,钢拱箱每隔 4 m 设置一道横隔板,钢拱塔采用钢混结合过渡的方式与混凝土拱座相连并固结于拱座。设计荷载为:城-A 级,人群荷载 3.5 kN/m²。桥梁结构布置图如图 3,斜拉桥材料特性如表 1。

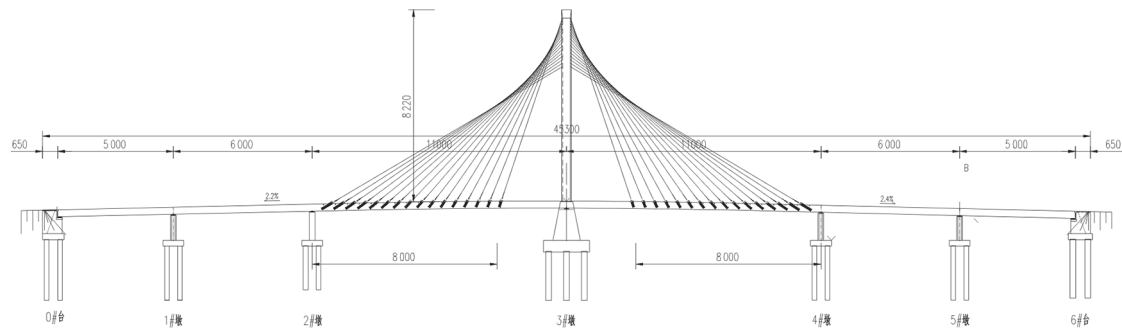


图 1 桥梁立面图(单位:cm)
Fig.1 Elevation of the bridge (unit: cm)

表 1 工程背景斜拉桥材料参数
Tab.1 Material parameters of the cable-stayed bridge

构件	材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
主梁桥面板	50 号聚丙烯纤维网混凝土	3.45E+04	0.2	2 549
主塔及主梁	50 号混凝土	3.45E+04	0.2	2 549
辅助墩	40 号混凝土	3.25E+04	0.2	2 549
主塔承台	30 号混凝土	3.00E+04	0.2	2 549
斜拉索	钢绞线	2.0E+05	0.3	7 850

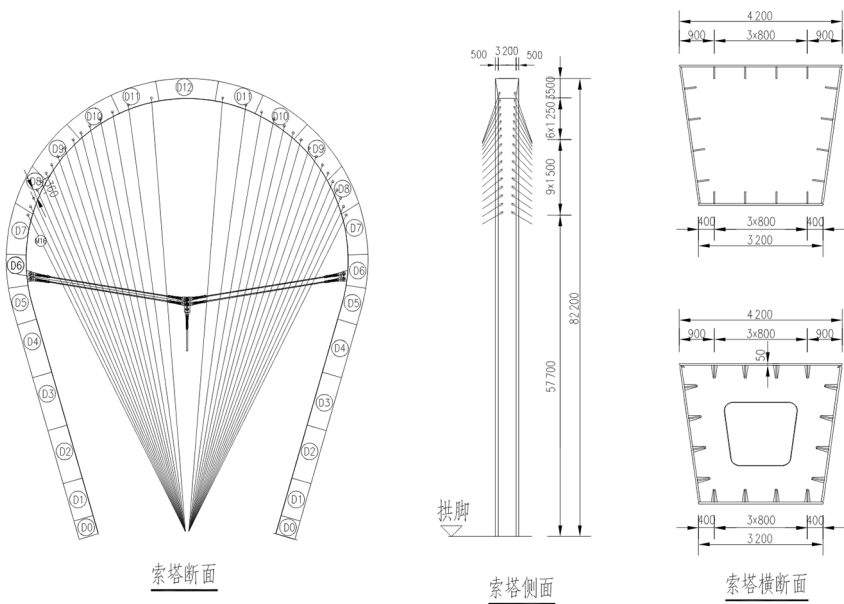


图 2 主塔断面布置示意图(单位:cm)

Fig.2 Schematic diagram of the main tower's section layout (unit: cm)

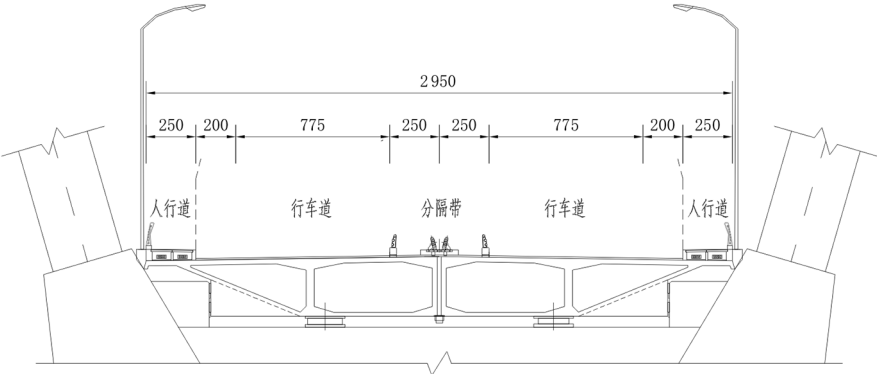


图 3 桥梁断面布置示意图(单位:cm)

Fig.3 Schematic diagram of the bridge's section layout (unit: cm)

2 斜拉桥非线性动力时程响应分析

2.1 整体有限元模型

基于 MIDAS CIVIL 程序建立工程背景斜拉桥有限元模型,其中主塔和主梁采用梁单元模拟,支座约束方式与实际桥梁支座约束方式相同。斜拉索采用只受拉不受压的索单元模拟,拉索的初始内力通过已知的桥面线形,拉索长度及桥面自重迭代计算生成。所建立的有限元模型如图 4 所示。

2.2 地震波输入

本文根据结构的基频及工程背景斜拉桥的场地特性选取 Lander-amboy 波及 Cerro Prieto 波进行地震波输入,图 5、6 分别为两种波形的加速度

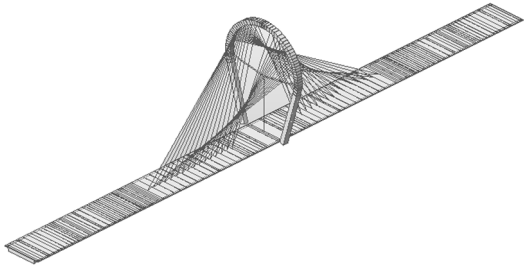


图 4 斜拉桥有限元模型

Fig.4 Finite element model of the cable-stayed bridge

时程曲线及加速度反应谱。由图可知, Lander amboy 波的卓越周期为 0.16 s,而 Cerro Prieto 的卓越周期为 0.33 s, Cerro Prieto 波的卓越周期与工程背景斜拉桥的卓越周期更为接近(0.53 s)。

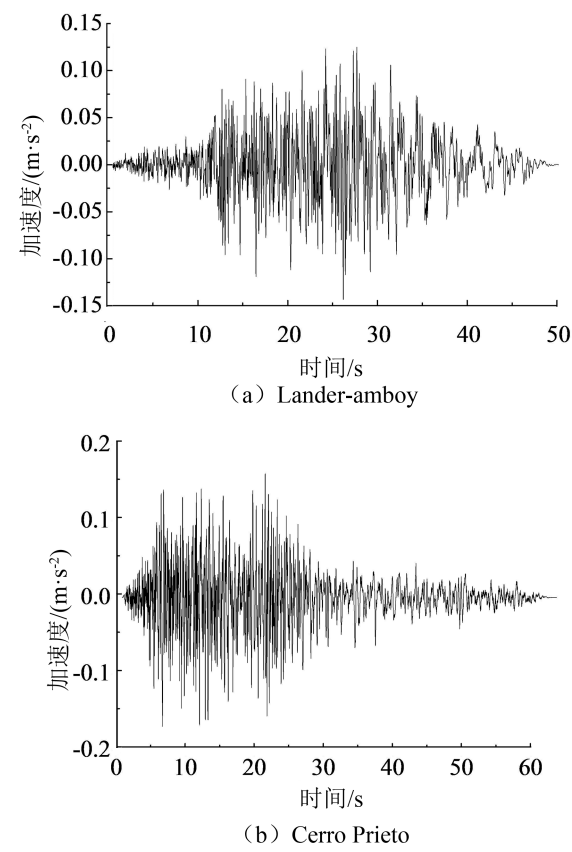


图 5 输入地震波位移时程曲线

Fig.5 Time-history curves of the displacements of the input seismic waves

2.3 地震响应特性分析

选取工程背景斜拉桥主梁梁端纵桥向位移 (L_d 单位: m) 及主梁梁端纵桥向加速度 (A_d 单位: m/s^2) 作为地震响应特征指标。表 2 为在不同加速度地震波作用下主梁梁端纵桥向位移及加速度响应峰值。图 7 为不同地震波作用下主梁梁端纵桥向位移及加速度响应峰值的对比。由图表可知,在输入不同加速度峰值的相同地震波,梁端位移及加速度响应均随着输入地震波加速度峰值的增大而增大。对于加速度响应,当输入地震波小于 $0.2 g$ 时候,响应的增大与输入地震波强度的增大基本呈现线形关系,当输入地震波加速度峰值超过 $0.2 g$ 时,加速度响应增长速度加快。对于位移响应,随着输入地震波强度的增大,位移响应增加的速度减慢。通过对比可知。卓越周期与结构固有周期较为接近的 Cerro Prieto 对斜拉桥加速度响应的影响较大。

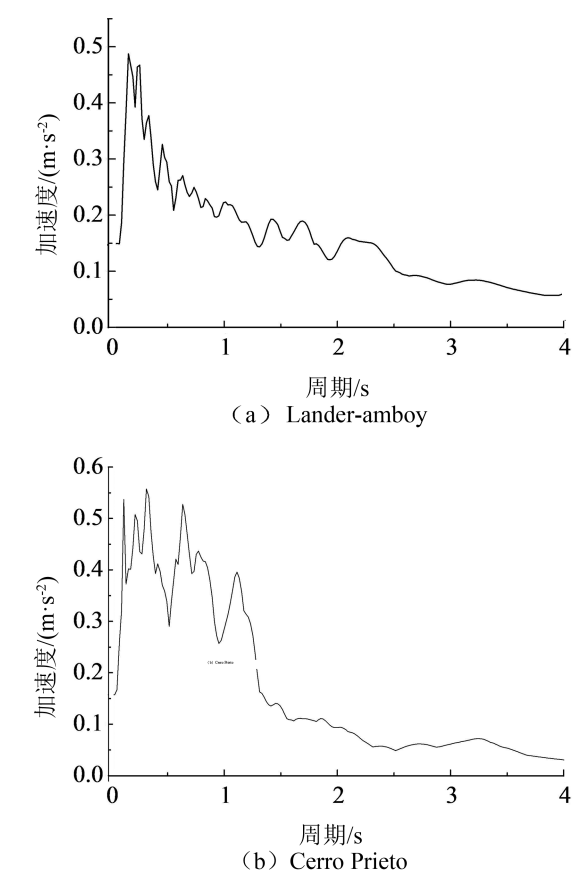


图 6 输入地震波位移时程曲线

Fig.6 Time-history curves of the displacements of the input seismic waves

表 2 主梁梁端位移及加速度响应峰值

Tab.2 Main girder end's displacements and its acceleration response's peak values

输入地震波 加速度峰值	加速度响应峰值/ ($m \cdot s^{-2}$)		位移响应峰值/ m	
	La- L_d	Cp- L_d	La- A_d	Cp- A_d
0.05	1.15	1.47	0.16	0.27
0.10	2.17	2.86	0.36	0.42
0.20	4.55	5.17	0.41	0.66
0.30	7.53	9.88	0.58	0.57

注: La- L_d :Lander-amboy 地震波作用下主梁梁端纵桥向加速度响应峰值;Cp- L_d :Cerro Prieto 地震波作用下主梁梁端纵桥向加速度响应峰值;La- A_d :Lander-amboy 地震波作用下主梁梁端纵桥向位移响应峰值;Cp- A_d :Cerro Prieto 地震波作用下主梁两端纵桥向位移响应峰值。

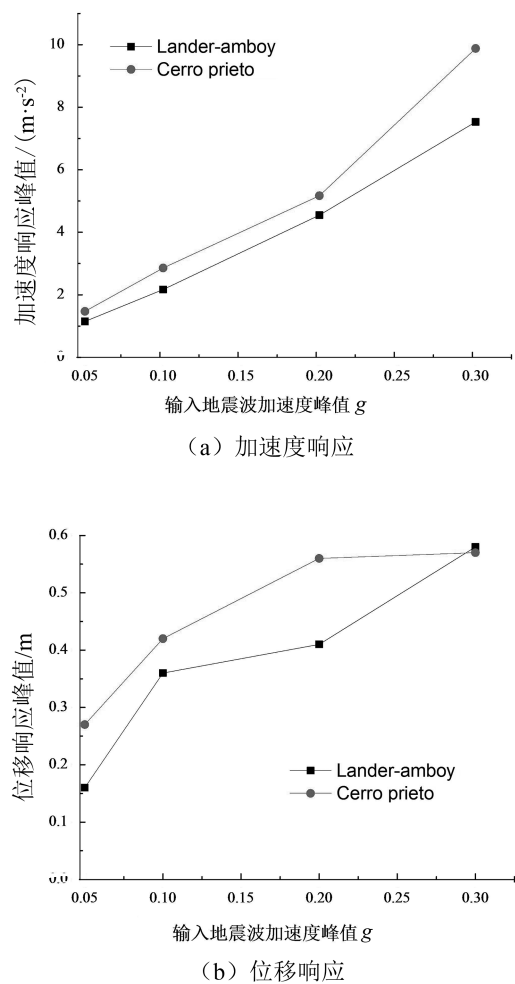


图 7 不同地震波作用下结构梁端响应峰值对比
Fig.7 Peak value comparison of girder-end's response under different seismic waves

2.4 行波效应对地震响应特性分析的

采用大质量法^[10]对有限元模型进行考虑行波效应的地震波输入。采用的输入地震波为加速度峰值不同的 Lander-amboy 波,考虑到工程背景斜拉桥跨径较小,本文选取行波效应的视波速分别为 100、200 及 300 m/s 三种较慢的视波速。图 8 为不同视波速的行波效应作用下,工程背景斜拉桥主梁梁端加速度及位移响应峰值的对比。由图可知,在不同视波速的行波效应作用下,结构的位移响应影响不大,结构的加速度响应影响明显。行波效应可以明显的增加主梁梁端的加速度响应,且随着视波速的增大,加速度响应峰值也随之增大。

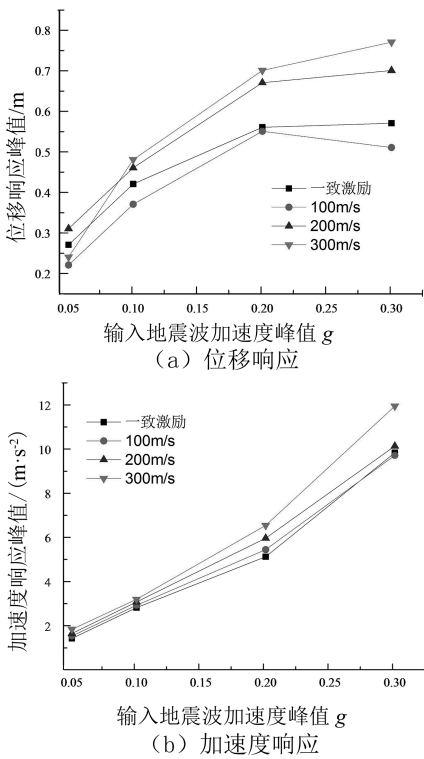


图 8 行波效应作用下结构梁端响应峰值对比
Fig.8 Peak value comparison of girder-end's response under different travelling wave effects

3 基于粘滞阻尼器的斜拉桥减震效应分析

阻尼器的阻尼系数 C 对阻尼器的性能影响很大,不同的阻尼系数也对结构的响应影响完全不同,本文首先通过在工程背景斜拉桥塔梁连接的位置安装不同阻尼系数的粘滞阻尼器来确定最适合于该桥的粘滞阻尼器的设计参数,接着考察不同加速度峰值地震波作用下阻尼器的减震效果。

3.1 粘滞阻尼器设计参数的确定

图 9 为安装不同阻尼系数的阻尼器后 0.1 g 的 Lander-amboy 波作用下,工程背景斜拉桥主梁梁端位移响应峰值。由图可知,当阻尼系数 C 小于等于 25 000 $kN \cdot s/m$ 时,随着阻尼系数的增加,主梁梁端位移响应明显减小,但当阻尼系数 C 大于 25 000 $kN \cdot s/m$ 时,主梁位移响应基本不变。因此确定阻尼系数 $C = 25\ 000\ kN \cdot s/m$ 为结构的最优阻尼参数,选取该阻尼系数纵桥向粘滞阻尼器安装在工程背景斜拉桥塔梁连接处,作为桥梁的减震措施。

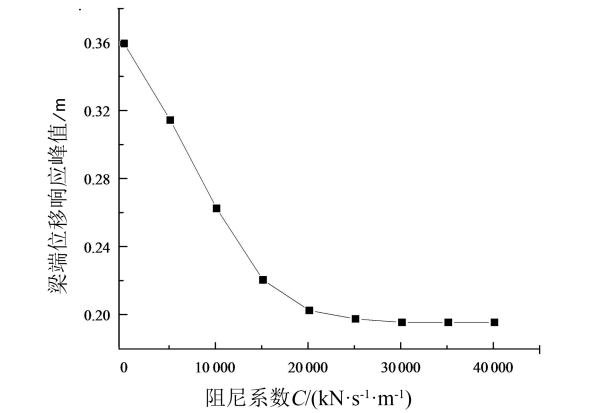


图 9 阻尼系数与斜拉桥主梁梁端位移响应峰值关系曲线

Fig.9 Curve of the relationship between the damping coefficient and peak values of displacement response of the girder-end of the cable-stayed bridge

表 3 安装阻尼器前后主梁梁端位移及加速度响应峰值

输入地震波 加速度峰值 g	无阻尼器		有阻尼器		减震率/%	
	$L_a - L_d / \text{m}$	$L_a - A_d / \text{m/s}^2$	$L_a - L_d$	$L_a - A_d$	$L_a - L_d$	$L_a - A_d$
0.05	0.16	1.15	0.079	0.97	50.6	15.7
0.10	0.36	2.17	0.187	1.79	48.1	17.5
0.20	0.41	4.55	0.369	3.78	10.0	16.9
0.30	0.58	7.53	0.417	4.52	28.1	40.0

4 结论

- 1) 相比 Lander-amboy 波卓越周期与桥梁固有周期较为接近的 Cerro Prieto 波能够引起结构较大的地震响应。
- 2) 行波效应能够显著增大工程背景斜拉桥

3.2 粘滞阻尼器减震效果分析

表 3 为塔梁连接处安装粘滞阻尼器后,桥梁在不同地震波作用下地震响应的减震率。由表可知,安装阻尼器后,在不同强度地震波作用下,工程背景斜拉桥主梁梁端位移及加速度响应均有所减小。其中对于位移响应减小的效果更为明显,输入地震波强度越小,位移响应的减震率越大。对于加速度响应输入地震波强度越大,加速度响应减震率越大。粘滞阻尼器对于工程背景斜拉桥的减震效果良好。

的地震响应,且随着视波速的增大,桥梁的加速度响应明显增大。

3) 阻尼系数 $C = 25\ 000\ \text{kN} \cdot \text{s/m}$ 为工程背景斜拉桥的最优粘滞阻尼器设计参数,且在塔梁连接处安装该参数粘滞阻尼器后,斜拉桥减震效果显著,尤其能明显减小结构的位移响应。

参考文献：

[1] 范立础,卓卫东. 桥梁延性抗震设计[M]. 北京:人民交通出版社, 2001.

[2] 韩振峰,叶爱君,范立础. 千米级斜拉桥的动力几何非线性分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(6): 67-73.

[3] 龙晓鸿,李黎,唐家祥,等. 澳函第三大桥斜拉桥的动力特性及线性地震反应分析[J]. 工程力学, 2004, 21(6): 166-171.

[4] 邵长江,钱永久. 非一致地震激励下大跨度斜拉桥空间响应分析[J]. 中南公路工程, 2006, 31(6): 51-54.

[5] 魏德敏,孔鹏,高晓楠. 大跨斜拉桥非一致激励地震响应研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(1): 26-30.

[6] 范立础,王君杰,陈玮. 非一致地震激励下大跨度斜拉桥的响应特征[J]. 计算力学学报, 2001, 18 (3): 358-363.

[7] 叶爱君,胡世德,范立础. 超大跨度斜拉桥的地震位移控制[J]. 土木工程学报, 2004, 37(12): 38-43.

[8] 徐秀丽,刘伟庆,李龙安,等. 斜拉桥结构减震设计优化研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(2): 119-124.

[9] 徐青松. 异形独塔单索面斜拉桥地震响应分析和钢桥面详细应力分析[D]. 成都:西南交通大学, 2013.

[10] Burdette N J, ELNASHAI A S. Effect of asynchronous earthquake motion on complex bridges II : Results and implications on assessment[J]. Journal of Bridge Engineering, 2008, 13(2): 166-172.

(责任编辑：陈雯)