施成, 蔺鹏臻, 周朋, 等. 多点激励下大跨度连续钢桁架柔性拱桥空间地震响应分析[J]. 地震工程学报, 2018, 40(2): 273-278. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.273

SHI Cheng, LIN Pengzhen, ZHOU Peng, et al. Spatial Seismic Response Analysis of Long-span Continuous Steel Truss Flexible Arch Bridge Under Multi-Support Excitations[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(2):273-278. doi:10.3969/j. issn.1000-0844.2018.02.273

# 多点激励下大跨度连续钢桁架柔性拱桥 空间地震响应分析◎

施 成1, 蔺鹏臻2, 周 朋1, 何志刚1

(1. 兰州交通大学 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室,甘肃 兰州 730070;2. 兰州交通大学土木工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要:基于多自由度空间结构体系地震响应分析的基本理论,利用 ANSYS 建立空间有限元模型, 采用动力时程分析法分析某大跨度连续钢桁架柔性拱桥在一致和非一致激励作用不同地震工况下 的空间地震响应。研究结果表明:非一致激励作用下,拱肋轴力、主桁弯矩峰值出现在拱脚和边墩 附近;地震波组合输入较其单向输入拱脚轴力和面内弯矩最大分别可达 1.28 和 8.32 倍;非一致输 入较一致激励作用拱脚轴力和面内弯矩分别可达 2.5 和 8.4 倍;地震波横向输入较纵向输入横向位 移峰值比可达 2.4 倍,纵向输入较横向输入纵向位移峰值比可达 2.6 倍;结构的支座形式对结构构 件地震响应结果也有一定影响;建议大跨度钢桁拱桥抗震设计应充分考虑地震波的空间和时间效应。 关键词:钢桁架拱桥;时程分析;一致激励;非一致激励 中图分类号: U441<sup>+</sup>.5 文葷编号: 1000-0844(2018)02-0273-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.02.273

# Spatial Seismic Response Analysis of Long-span Continuous Steel Truss Flexible Arch Bridge Under Multi-Support Excitations

SHI Cheng<sup>1</sup>, LIN Pengzhen<sup>2</sup>, ZHOU Peng<sup>1</sup>, HE Zhigang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Based on basic theory of the seismic response of a multi-degree-of-freedom spatial structure system, the spatial seismic responses of a long-span continuous steel truss flexible arch bridge under uniform and non-uniform excitations are analyzed using the dynamic time-history analysis method and spatial finite element model created by ANSYS software. Results of analysis show that the peak value of the arch rib's axial force and the main truss's bending moment appear around the arch foot and side of pier under non-uniform excitation. Further results are as follows: the maximum axial force at the arch foot and the in-plane bending moment under the multi-direc-

① 收稿日期:2017-05-12

作者简介:施 成(1991-),男,硕士。E-mail:shcheng189@163.com。

通信作者: 蔺鹏臻(1977-), 男, 甘肃甘谷人, 教授, 博导, 从事桥梁结构设计理论研究。E-mail: pzhlin@mail.lzjtu.cn。

基金项目:国家自然科学基金重大项目(11790281);中国铁路总公司科技研究开发计划课题(2017G010-C);兰州交通大学优秀平台资 助(201601)

tional input of a seismic wave are 1.28 and 8.32 times greater than those under single-directional input, respectively; the axial force at the arch foot and the in-plane bending moment under non-uniform excitation are 2.5 and 8.4 times greater than those under uniform excitation, respectively; the peak value of lateral displacement at the arch rib under the a transverse direction input is 2.4 times greater than that under a longitudinal direction input; while the peak value of longitudinal displacement at the arch rib under the input of longitudinal direction is 2.6 times greater than that under the input of transverse direction. The bearing form also has some influence on the seismic response of structure. Results show the necessity of considering the space and time effect of seismic waves during the seismic design of long-span steel truss arch bridges.

Key words: steel truss arch bridge; time-history analysis; uniform excitation; non-uniform excitation

# 0 引言

大跨度钢桁架拱桥是连接交通运输和国民经济 发展的重要生命线,因其结构轻、跨越能力强、施工 快捷方便和外形美观等优点被广泛应用。地震是一 种突发性、破坏力很强的自然灾害,研究地震作用下 大跨度钢桁架拱桥的地震响应是很有必要的。地震 作用分析理论主要有静力理论、反应谱理论、随机振 动理论和动力时程分析理论[1],其中静力理论忽略 了结构自身动力特性的影响,只适合低矮的、刚度较 大的建筑结构;反应谱理论仅能给出结构各振型反 应的最大值,而丢失了与最大值和振型组合有关的 重要信息,原则上只适用于线弹性结构体系;随机振 动理论计算复杂,工程设计中应用较少;动力时程分 析理论能够清楚地反映地震的频谱、振幅和持时,同 时能够考虑结构的各种特性,随着地震记录的增多 和计算机的发展,动力时程分析理论得到了广泛的 应用。已有研究表明,多点激励对大跨度桥梁的内 力和位移响应均有较大影响[2-4]。近年来,不少学者 对大跨度拱桥在地震波一致激励、行波效应和多点 激励下的地震响应进行了研究,并取得了一定的成 果[5-9]。这些研究主要是针对只有中跨设置拱肋的 拱桥、钢-混组合体系拱桥和上承式钢桁架拱桥,而 对布置三拱的三跨连续钢桁架拱桥的研究较少。因 此本文以某三跨连续钢桁架柔性拱桥为背景,建立 空间有限元模型,利用 ANSYS/Transient Dynamism,采用时程分析法,对该桥在一致激励和多点 非一致激励作用下的地震响应进行分析,以期为相 似桥梁的抗震设计提供一定的参考价值。

#### 1 计算模型

#### 1.1 工程概况

本文以银川机场黄河特大桥为背景,主桥全长为1200m,孔跨布置为1~96m简支钢桁梁+2联

3×168 m 连续钢桁架柔性拱+1~96 m 简支钢桁 梁。简支钢桁梁和连续钢桁柔性拱桥均为下承式钢 桁梁结构,主桁宽 13.8 m,桁高 12.8 m,拱圈矢高 28 m,矢跨比 1/4.71,桥面采用正交异性钢桥面板, 宽 12.7 m。大桥采用双线交通设置,线路等级为客 运专线,桥址区地震动峰值加速度采用 0.2g,桥梁 按 WI 度设防。连续钢桁架柔性拱几何图形如图 1 所示。



#### 1.2 有限元模型

考虑该桥桥式的对称性,本文只分析三跨连续 钢桁架拱桥的空间地震响应。为真实反映结构的空 间地震响应,利用大型有限元软件 ANSYS 建立了 三跨连续钢桁架柔性拱桥的三维空间有限元模型, 如图 2 所示。



Fig.2 Finite element model

在有限元建模中主桁、拱肋、平联、横联和桥门 架均采用空间梁单元模拟,桥面板运用梁格法简化 实现。根据结构的支承条件,通过耦合自由度方式 将上部结构和桥墩连接起来。在非线性地震时程分 析中,要考虑结构的自重和阻尼效应。由于自重是 恒荷载,在地震时程分析中不能有时间积分,故本文 采用连续求解法处理。结构的阻尼采用 Rayleigh 阻尼,其数学表达式为: $C = \alpha \times M + \beta \times K$ ,式中: $\alpha$ 、  $\beta$ 分别为质量阻尼和刚度阻尼,其值取结构的前两 阶频率计算而得<sup>[10-11]</sup>。

# 2 地震分析理论

# 2.1 地震动力方程

大跨度桥梁结构属于多自由度体系,其地震运动方程可表示为<sup>[12-15]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_{ss} & \boldsymbol{M}_{sg} \\ \boldsymbol{M}_{gs} & \boldsymbol{M}_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{X}}_{s} \\ \ddot{\boldsymbol{X}}_{g} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_{ss} & \boldsymbol{C}_{sg} \\ \boldsymbol{C}_{gs} & \boldsymbol{C}_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{X}}_{s} \\ \dot{\boldsymbol{X}}_{g} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_{ss} & \boldsymbol{M}_{sg} \\ \boldsymbol{M}_{gs} & \boldsymbol{M}_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{s}' \\ \boldsymbol{X}_{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F}_{s} \\ \boldsymbol{F}_{g} \end{bmatrix}$$
(1)

式中: $\ddot{X}_{s}$ 、 $\dot{X}_{s}$ 和 $X_{s}$ 分别为非支承处自由度的绝对加速度、速度和位移向量; $M_{ss}$ 、 $C_{ss}$ 和 $K_{ss}$ 为非支承处相应的质量、阻尼和刚度矩阵; $\ddot{X}_{g}$ 、 $\dot{X}_{g}$ 和 $X_{g}$ 分别为支承处自由度的绝对加速度、速度和位移向量; $M_{gg}$ 、 $C_{gg}$ 和 $K_{gg}$ 为支承处相应的质量、阻尼和刚度矩阵; $M_{gs}$ 、 $C_{gs}$ 和 $K_{gs}$ 为支承处自由度和非支承处自由度 耦合的质量、阻尼和刚度矩阵; $M_{sg}$ 、 $C_{sg}$ 和 $K_{gg}$ 为支承处自由度和非支承处自由度 相定和刚度矩阵; $M_{gg}$ 、 $C_{gg}$ 和 $K_{gg}$ 为非

当结构只受地震荷载作用时,式(1)中的 $F_s =$  0,仅有支承反力 $F_s$ 。将(1)展开得:

 $M_{ss}\ddot{X}_{s} + C_{ss}\dot{X}_{s} + K_{ss}\ddot{X}_{s} = -(M_{sg}\ddot{X}_{g} + C_{sg}\dot{X}_{g} + K_{sg}\ddot{X}_{g})$ (2)

结构的总位移可以分解成拟静力位移和动位 移,静位移是由支点位移引起的,动位移是由结构的 惯性引起的<sup>[16-17]</sup>。各节点总位移可表示为式(3):

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{s} \\ \boldsymbol{X}_{g} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{s}^{s} \\ \boldsymbol{X}_{g}^{s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_{s}^{d} \\ \boldsymbol{X}_{g}^{d} \end{bmatrix}$$
(3)

墩底本身不发生振动,其随地基按照地震动输 入运动,故式(3)中X<sup>s</sup><sub>g</sub>=0。通过静力方法求解出拟 静力位移,拟静力位移X<sup>s</sup><sub>s</sub>的表达式为:

$$\boldsymbol{X}_{s}^{s} = -\boldsymbol{K}_{ss}^{-1} \times \boldsymbol{K}_{sg} \times \boldsymbol{X}_{g} = \boldsymbol{R} \times \boldsymbol{X}_{g}$$
(4)  
式中: **R** 为影响矩阵。

联立式(2)、(3)和(4)得:

 $\boldsymbol{M}_{ss}\ddot{\boldsymbol{X}}_{s}^{d} + \boldsymbol{C}_{ss}\dot{\boldsymbol{X}}_{s}^{d} + \boldsymbol{K}_{ss}\boldsymbol{X}_{s}^{d} = -(\boldsymbol{M}_{ss}\boldsymbol{R} + \boldsymbol{M}_{sg})\ddot{\boldsymbol{X}}_{g} -$ 

$$(\boldsymbol{C}_{ss}\boldsymbol{R} + \boldsymbol{C}_{sg})\dot{\boldsymbol{X}}_{g} \qquad (5)$$

一般结构阻尼对式(5)右边的影响可以忽略, 故式(5)简化为:

# 2.2 地震动选择

本文采用典型的天津地震波和 El-Centro 波为 地震激励研究大桥的空间地震响应,取时间步长 *dt* =0.1 s,计算时间历程为 19 s,时间步长共计 190 步。桥址区地震动峰值加速度采用 0.2g,保持地震 波的频谱特征,调整其水平、竖向加速度。图 3~4 分别为调整后的天津波、El-Centro 波水平和竖向加 速度时程曲线。



图 3 峰值调整后天津波水平、竖向加速度时程曲线 Fig.3 Horizontal and vertical acceleration time history curves under Tianjin wave after adjusting the peak value



图4 峰值调整后 El-Centro 波水平、竖向加速度时程曲线

Fig.4 Horizontal and vertical acceleration time history curves under El-Centro wave after adjusting the peak value

# 3 地震响应计算结果

#### 3.1 多点非一致激励

地震波在传播过程中,地面的运动在时间和空间 上具有高度的变化性,对于大跨度桥梁而言,各桥墩 所处的地质条件可能具有显著的差别,因此在分析大 跨度桥梁空间地震响应时,有必要考虑多点非一致激励不同输入的情况。本文以天津波和 El-Centro 波为 激励源,分别在 A、B 墩输入 El-Centro 波,在 C、D 墩 输入天津波,考虑了 4 种地震荷载工况下桥梁的地震 响应。4 种地震荷载工况分别为:(1)地震波横向输 入;(2)地震波纵向输入;(3)地震波横向+竖向组合 输入;(4)地震波纵向+竖向组合输入。

通过编制 APDL 代码计算得到上述多点非一 致激励下 4 种工况下大桥的空间地震响应,拱肋轴 力和主桁弯矩包络图如图 5~6 所示,大桥主要控制 截面的内力和位移峰值如表 1~2 所示。

由计算图表可知:

(1) 拱肋轴力峰值出现在拱脚和边墩附近截 面,主桁弯矩峰值出现在拱脚附近截面,其原因主要 是地震荷载作用下地震效应是通过桥墩传递到上部 结构,故引起拱脚和边墩附近截面较大的内力。为 了安全起见,建议加强桥墩附近桥梁结构的设计,同 时在墩顶采用减隔震措施以减小地震对上部结构的 影响。

(2)地震波组合输入下,桥梁结构大部分构件的内力较其单向输入下结构内力大,拱脚轴力和面内弯矩最大分别可达到1.28和8.32倍,所以在桥梁结构抗震设计中,有必要考虑地震波的空间传播特性。



Fig.5 Envelope map of the axial force of arch rib





表 1 多点非一致激励不同地震荷载工况下各主要截面内力峰值

Table 1 Peak internal force of main sections subjected to different seismic load conditions

under	multi-support	non-uniform	excitations
unuci	muni support	non unnorm	CACITATIONS

工况 —		轴力/MN		ī	面内弯矩/(MN・m)			面外弯矩/(MN・m)		
	拱脚 B	中跨拱顶	拱脚 C	拱脚 B	1/2 中跨主桁	拱脚 C	拱脚 B	拱脚 C		
1	34.326	8.585	15.787	2.671	1.897	2.479	0.546	0.754		
2	17.364	9.117	32.849	0.171	2.006	0.489	0.372	0.508		
3	37.567	7.928	16.421	3.059	2.115	3.837	0.503	0.669		
4	22.155	8.208	30.400	1.423	2.109	2.362	0.316	0.418		

表 2 多点非一致激励不同地震荷载工况下各主要节点位移峰值

Table 2 Peak displacement of main nodes subjected to different seismic load conditions

under	multi-support	non-uniform	excitations
unuer	munti support	non unitorin	CACITATIONS

		左边日	跨 1/2			中跨	1/2		右边跨 1/2			
工况	拱	肋	主	桁	拱	肋	主	桁	拱	肋	主	桁
	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
1	0.076	3.439	0.067	3.340	0.165	1.369	0.011	1.373	0.094	0.117	0.096	0.159
2	0.180	0.043	0.175	0.052	0.179	0.067	0.182	0.086	0.185	0.099	0.194	0.135
3	0.096	3.440	0.088	3.342	0.157	1.370	0.027	1.373	0.115	0.115	0.117	0.157
4	0.211	0.043	0.208	0.053	0.328	0.068	0.198	0.086	0.217	0.096	0.227	0.132

(3) 拱肋、主桁横向位移在每跨跨中位置较大, 纵向位移沿桥长变化相对比较平缓,其原因主要是 桥梁的横向刚度较纵向刚度小。El-Centro 波横向 输入时引起的横向位移很大,其主要是由地震波特

L/m

#### 3.2 一致激励

地震波一致激励分析有两种方法,分别是一致

加速度输入法和一致位移输入法。本文以天津波为 激励源,采用一致加速度输入法,按照4种地震荷载 工况对大桥地震响应进行分析。一致激励作用下, 拱肋的横、纵向位移包络图如图7所示,大桥主要控 制截面的内力峰值如表3所列。



#### 图 7 拱肋位移包络图

Fig.7 Envelope map of the displacement of arch rib

表 3 -	-致激励不	同地震荷詞	载工况下各	ら主要截面	内力峰值
-------	-------	-------	-------	-------	------

Table 3 Peak internal force of main sections subjected to different seismic load conditions under uniform excitation

工况 —		轴力/MN		百	面内弯矩/(MN・m	面外弯矩/(MN・m)		
	拱脚 B	中跨拱顶	拱脚 C	拱脚 B	1/2 中跨主桁	拱脚 C	拱脚 B	拱脚 C
1	15.272	6.804	15.259	0.447	0.703	0.451	0.505	0.494
2	15.272	6.804	36.547	0.447	1.911	0.971	0.289	0.550
3	15.272	6.804	15.258	0.505	0.728	0.459	0.532	0.523
4	15.272	6.804	33.142	0.455	1.900	0.966	0.297	0.518

由计算图表可知:

(1) 地震波横向输入时,拱肋横向位移较大,纵 向位移较小,不同工况下,横向位移峰值比可达 2.4 倍;同理纵向输入时,纵向位移较大,横向位移较小, 不同工况下,纵向位移峰值比可达 2.6 倍;竖向地震 波对桥梁结构水平位移影响较小;拱脚 B 处的横向 位移接近 0,拱脚 C 处的横、纵向位移接近 0,这是因 为拱脚 B 处为活动支座,限制了横向位移,拱脚 C 为固定支座,支座类型对结构地震位移响应影响也 很大。

(2) 一致激励下,地震波纵向、纵向竖向组合输 入对设置固定支座拱脚 C 的内力影响较大,轴力和 面内弯矩较设置活动支座拱脚 B 的 2.4 和 2.2 倍; 其他位置在不同工况下的内力变化很小,支座类型 对结构地震内力响应影响很大。

(3)同种工况下,地震波多点非一致输入较一 致激励作用拱脚轴力和面内弯矩分别可达 2.5 和 8.4 倍,考虑地震波非一致作用很有必要。

# 4 结论

通过建立大跨度连续钢桁架柔性拱桥空间有限 元模型,采用动态时程分析法,考虑地震波传播的空 间效应,分别按多点非一致和一致激励输入的不同地 震工况分析了大桥的空间地震响应,得到以下结论:

(1)多点非一致激励作用下,拱肋轴力、主桁弯 矩峰值出现在拱脚和边墩附近。为了安全起见,建 议加强拱脚和桥墩附近桥梁截面的设计,同时在墩 顶采用减隔震措施以减小地震对上部结构的影响。

(2) 地震波组合输入下,桥梁结构的内力较其 单向输入下结构内力大,拱脚轴力和面内弯矩最大 分别可达到 1.28 和 8.32 倍。在桥梁结构抗震设计 中需考虑地震波的空间传播特性。

(3)地震波横向输入对横向位移影响大,对纵向位移影响小,横向输入较纵向输入拱肋横向位移峰值比可达 2.4 倍;同理纵向输入时对纵向位移影响大,对横向位移影响小,纵向输入较横向输入拱肋

纵向位移峰值比可达 2.6 倍;竖向地震波对桥梁结 构水平位移影响较小。

(4)结构大部分构件内力在多点非一致激励下 较一致激励下大。同种工况下,地震波多点非一致 输入较一致激励作用拱脚轴力和面内弯矩分别可达 2.5和8.4倍。考虑地震波非一致作用很有必要。

(5)结构的支座形式对结构构件地震响应结果 也有一定的影响;在大跨度钢桁架拱桥抗震设计时, 建议结合场地类型选择几组地震波,考虑地震的空 间和时间效应,按照不同组合、不同工况分别研究结 构的地震响应。

#### 参考文献(References)

[1] 宋瑞华.中承式钢箱系杆拱桥地震响应研究[D].兰州:兰州理 工大学,2014.

SONG Ruihua. Study on Seismic Response of Half-through Steel Box Tied Arch Bridge[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.

[2] 刘爱荣,张俊平,禹奇才,等.多点激励下大跨续钢架拱组合桥 的空间地震响应分析[J].暨南大学学报(自然科学版),2007, 28(3):246-250.

LIU Airong, ZHANG Junping, YU Qicai, et al. Spatial Seismic Response Analysis of Long-span Combined Bridge of Continuous Rigid-frame and Arch Structure Under Multiple Support Excitation[J].Journal of Jinan University (Science and Technology), 2007, 28(3): 246-250.

- [3] 刘春城,张哲,石磊.多支承激励下自锚式悬索桥空间地震反应 分析[J].哈尔滨工业大学学报,2004,36(11):1568-1570. LIU Chuncheng, ZHANG Zhe, SHI Lei. Spatial Seismic Response Analysis of Self-anchored Suspension Bridges Subjected to Multiple-supported Excitations[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2004,36(11):1568-1570.
- [4] 刘洪兵,朱晞.大跨度斜拉桥多点支承激励地震响应分析[J].
   土木工程学报,2001,34(6):38-44.

LIU Hongbing, ZHU Xi. Seismic Response Analysis of Longspan Cable-stayed Bridges Under Multiple-supported Excitations[J].China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 38-44.

- [5] 赵灿晖,周志祥.大跨度上承式钢桁拱桥的地震响应分析[J].
  铁道科学与工程学报,2006,5(3):6-11.
  ZHAO Canhui,ZHOU Zhixiang.Seismic Response Analysis of Long-span Steel Braced Deck-type Arch Bridge[J].Journal of Railway Science and Engineering,2006,5(3):6-11.
- [6] 刘爱荣,唐潘,禹奇才,等.行波激励下大跨度拱桥随机地震响 应分析[J].广州大学学报(自然科学版),2011,10(3):51-55. LIU Airong,TANG Pan,YU Qicai,et al .Random Seismic Response of Long-span Arch Bridge Under Effect of Traveling Wave[J].Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition),2007,10(3):51-55.
- [7] LIU Airong, YU Qicai, ZHANG Junping. Seismic Response of Long Span Continuous Rigid-frame Arch Bridge[J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2007, 24(3):

228-232.

- [8] 陈代海,郭文华.大跨度钢桁架拱桥的空间地震响应分析[J].
   中南大学学报(自然科学版),2010,41(4):1590-1596.
   CHEN Daihai,GUO Wenhua.Spatial Seismic Response Analysis of Long-span Steel Truss Arch Bridge[J].Journal of Central South University (Science and Technology), 2010,41(4): 1590-1596.
- [9] 禹奇才,刘爱荣,唐潘,等.大跨度拱桥随机地震响应分析[J]. 中山大学学报(自然科学版),2011,50(4):33-36.
  YU Qicai,LIU Airong,TANG Pan, et al.Random Seismic Response Analysis of Long-span Arch Bridge[J]. Acat Scientiarum Naturalium University Sunyatseni (Science and Technology),2011,50(4):33-36.
- [10] 马荣鑫,许剑.大跨钢桁架拱桥地震响应有限元分析[J].计算机辅助工程,2014,23(6):103-107.
   MA Rongxin, XU Jian. Finite Element Analysis on Seismic Response of Large-span Steel Truss Arch Bridge[J].Computer Aided Engineering,2014,23(6):103-107.
- [11] 杨华平,钱永久,邵长江,等.行波效应对大跨度上承式钢桁拱桥地震响应的影响[J].铁道建筑,2014(2):8-10. YANG Huaping,QIAN Yongjiu,SHAO Changjiang,et al.Influence of Traveling Wave Effect on the Seismic Response of Long-span Steel Truss Arch Bridge[J].Railway Engineering, 2014(2):8-10.
- [12] 高大峰,刘伯栋,张静娟.中承式钢筋混凝土拱桥自振特性分析[J].西北地震学报,2009,31(1):75-79.
   GAO Dafeng, LIU Bodong, ZHANG Jingjuan. Analysis on Self-vibration Characteristics of Half-through Reinforced Concrete Arch Bridge[J]. Northwestern Seismological Journal,2009,31(1):75-79.
- [13] 谢旭.桥梁结构地震响应分析与抗震设计[M].北京:人民交通 出版社,2006:57-58.
   XIE Xu. Seismic Response and Earthquake Resistant Design of Bridge[M].Beijing:China Communications Press,2006:57-58.
- [14] 范立础.桥梁抗震[M].上海:同济大学出版社,1997:32-33.
   FAN Lichu.Bridge Aseismic[M].Shanghai:Tongji University Press,1997:32-33.
- [15] 李正英,李正良,空间地震动作用下大跨度拱桥地震响应分析
  [J].重庆大学学报,2009,32(8):921-924.
  LI Zhengying,LI Zhengliang.Seismic Response of Long-span Arch Bridge Under Spatially Variable Seismic Exicitation [J].
  Journal of Chongqing University,2009,32(8):921-924.
- [16] 宗周红,赖苍林,林建筑.基于环境振动的既有预应力连续刚 构桥地震响应分析[J].铁道学报,2005,27(5):83-91.
   ZONG Zhouhong,LAI Canglin,LIN Jianzhu. Ambient Vibration-based Seismic Response Analysis of an Existing Prestressed Continuous Rigid-framed Bridge [J]. Journal of the China Railway Society,2005,27(5):83-91.
- [17] XU Kaiyan, WEI Demin, LIU Can. Earthquake Response Analysis of Cable-stayed Bridges Under Uniform And Multiple-support Excitation [J]. Science Technology and Engineering, 2007,7(10):2288-2291.