

· 土木与建筑工程 ·

地锚式斜拉-悬索协作体系桥竖弯振动基频计算公式

王绪旺

(商洛学院城乡规划与建筑工程学院, 陕西 商洛 726000)

摘要:为方便计算地锚式斜拉-悬索协作体系桥的竖向自振频率,以三跨连续支承协作体系为研究对象,在计入主塔刚度的影响下,应用能量法推导了该体系的竖向弯曲振动频率公式,并提出了主塔抗弯刚度影响系数的计算式;最后对本文所推导的公式的有效性进行了验证。研究表明:该协作体系的竖向弯曲振动基频略高于同等跨径布置的地锚式悬索桥的竖弯弯曲频率,其原因在于斜拉索对该体系刚度的贡献;本文所推导的竖弯基频计算值与数值计算误差能满足概念设计阶段的要求;该公式可用于该体系的初步概念设计中选择合适的结构计算参数。

关键词:桥梁工程;地锚式斜拉-悬索协作体系;竖弯频率;能量法;估算公式

中图分类号: U441.3 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2019)05-0025-05

doi:10.3969/j.issn.1673-159X.2019.05.004

Base Frequency Formulas of Vertical Vibration for Earth-anchored Hybrid Cable-suspension Bridge

WANG Xuwang

(College of Urban, Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo 726000 China)

Abstract: To calculate vertical frequency of the earth-anchored hybrid cable-suspension bridge (EAHCAB) conveniently, the earth-anchored hybrid cable-suspension bridge with double-tower was taken as research object. Frequency formulas for 1st vertical vibration modes were induced by the energy method and the influence of coefficient for tower flexural rigidity was introduced. Finally, the above analytic formulas were validated by the engineering project. The results indicate that the vertical vibration character of EAHCAB is slightly higher earth-anchored suspension bridge as the same of identical span arrangement, which is caused by the contribution of cable. The error between values calculated by the analytic formulas and the finite element method (FEM) meets with the requirement of conceptual design. The analytic formulas can be applied to select reasonable parameters for the EAHCAB in conceptual design stage.

Keywords: bridge engineering; earth-anchored hybrid cable-suspension bridge; vertical frequency; energy method; estimation formulas

随着经济和技术的发展,在沿海地区修建大跨度斜拉桥或悬索桥等桥型已经不能满足工程的需要。针对这一迫切需求国内外许多学者提出了斜拉-悬索协作体系。土耳其博斯普鲁斯海峡三桥的

建成,标志着该结构体系进入一个新的阶段,开展该结构体系固有振动特性研究具有较强的实用意义^[1-7]。文献[8]在计入主塔纵向抗弯刚度影响下,提出了对单跨简支地锚式悬索桥体系的竖弯基

收稿日期: 2018-08-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50908017);陕西省科技厅重点研发计划基金资助项目(2018GY-099)。

作者简介:王绪旺(1982—),男,讲师,硕士,主要研究方向为大跨度桥梁结构分析。

ORCID:0000-0001-6844-3754 E-mail:qqwangxuwang@126.com

引用格式:王绪旺.地锚式斜拉-悬索协作体系桥竖弯振动基频计算公式[J].西华大学学报(自然科学版),2019,38(5):25-29.

WANG Xuwang. Base frequency formulas of vertical vibration for earth-anchored hybrid cable-suspension bridge[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2019, 38(5): 25-29.

频修正的计算表达式;文献[9-11]在考虑主塔纵向抗弯刚度影响下,采用能量法推导了多塔悬索体系的竖弯振动估算实用公式,并提出了中塔纵向抗弯刚度影响系数;文献[12-14]以地锚式斜拉-悬索协作体系桥为研究对象,研究该结构的静动特性及不同约束条件对其力学性能的影响,遗憾的是未能给出相应的理论解。本文以三跨连续体系的地锚式悬索桥为研究对象,在计入主塔纵向抗弯刚度的影响下,采用能量法推导其竖弯振动基频估算实用公式,以供该协作体系桥在初步概念设计阶段选择合理计算参数或对数值计算结果进行复核。

1 基于能量法的地锚式协作体系的竖弯基频估算实用公式

1.1 地锚式斜拉-悬索协作体系的势能

主缆的势能主要由2部分组成,即主缆水平分力变化产生的弹性势能 U_{ce} 和主缆重力作用点变化引起的重力势能 U_{cg} ,即

主缆的弹性势能为:

$$U_{ce} = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n \frac{H_i^2 l_{s1}}{E_c A_c} + \sum_{i=1}^n \frac{H_i^2 l_{s2}}{E_c A_c} \right) \quad (1)$$

$$l_{s2} = \int_0^{l_c} \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 dx = l_c \left(1 + \frac{16}{3} f_c^2 \right) \quad (2)$$

$$l_{s1} = \int_0^{l_s} \left(\frac{ds}{dx} \right)^3 dx = \frac{l_s}{\cos^2 \theta} \left(1 + \frac{16}{3} f_s^2 \cos^4 \theta \right) \quad (3)$$

式中符号如图1所示。

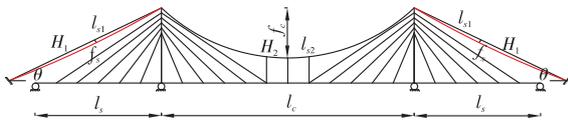


图1 桥跨布置立面

主缆的重力势能为

$$U_{cg} = \frac{1}{2} H_q \int_L \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 dx \quad (4)$$

式中: v 为加劲梁的振型函数; H_q 为主缆恒载作用下的水平分力。

拉索的弹性势能为

$$U_{ci} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci}}{L_{ci}} v^2 \sin^2 \alpha_{ci} \quad (5)$$

式中: $E_{ci} A_{ci}/L_{ci}$, α_{ci} 分别为拉索的单位轴向刚度及水平倾角。

加劲梁的弯曲势能为

$$\omega_b^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{H_i^2 l_{s2}}{E_c A_c} + \sum_{i=1}^n \frac{H_i^2 l_{s1}}{E_c A_c} + H_q \int_L \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 dx + \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci} v^2 \sin^2 \alpha_{ci}}{L_{ci}} + \int_L E_g I_g \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx + \sum_{i=1}^n \frac{(H_{i+1} - H_i)}{S_{ui}}}{\int_L m_c \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 dx + \int_L m_g \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 dx + \sum_{i=1}^n \frac{m_{ui}}{K_i^2} \left[\frac{\partial(H_{i+1} - H_i)}{\partial t} \right]^2 + \sum_{i=1}^n m_{hi} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 dx + \sum_{i=1}^n \frac{\omega_b^2}{3} m_{ci} v_{ci}^2 L_{ci}} \quad (15)$$

$$U_{gs} = \frac{1}{2} \int_L E_g I_g \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (6)$$

式中: $E_g I_g$ 为加劲梁的抗弯刚度。

$$\text{主塔的势能为 } U_i = \sum_{i=1}^n \frac{(H_{i+1} - H_i)}{2S_{ui}} \quad (7)$$

式中: H_i, H_{i+1} 分别为*i, i+1*号主跨的主缆的水平分力; S_{ui} 为第*i*号主塔的抗弯刚度。

该协作体系的势能为上述各构件的势能之和,即

$$U = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^n \frac{H_i^2 l_{s2}}{E_c A_c} + \sum_{i=1}^n \frac{H_i^2 l_{s1}}{E_c A_c} \right) + \frac{1}{2} H_q \int_L \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci} v^2 \sin^2 \alpha_{ci}}{L_{ci}} + \frac{1}{2} \int_L E_g I_g \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 dx + \sum_{i=1}^n \frac{(H_{i+1} - H_i)}{2S_{ui}} \quad (8)$$

1.2 地锚式斜拉-悬索协作体系的动能

$$\text{主缆的动能为 } T_c = \frac{1}{2} \int_L m_c \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 dx \quad (9)$$

式中: m_c 为主缆的单位桥长质量。

$$\text{加劲梁的动能为 } T_s = \frac{1}{2} \int_L m_g \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 dx \quad (10)$$

式中: m_g 为加劲梁的单位桥长质量。

主塔的动能为

$$T_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{m_{ui}}{K_i^2} \left[\frac{\partial(H_{i+1} - H_i)}{\partial t} \right]^2 \quad (11)$$

式中: m_{ui} 为第*i*号主塔的质量。

$$\text{吊索的动能为 } T_{hi} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_{hi} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 dx \quad (12)$$

式中: m_{hi} 为第*i*号吊索的质量。

$$\text{拉索的动能为 } T_{ci} = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_b^2}{6} m_{ci} v_{ci}^2 L_{ci} \quad (13)$$

式中: m_{ci} 为拉索的线均布质量。

该协作体系的动能为上述各构件的动能之和,即

$$T_c = \frac{1}{2} \int_L m_c \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \int_L m_g \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 dx + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{m_{ui}}{K_i^2} \left[\frac{\partial(H_{i+1} - H_i)}{\partial t} \right]^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n m_{hi} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 dx + \sum_{i=1}^n \frac{\omega_b^2}{6} m_{ci} v_{ci}^2 L_{ci} \quad (14)$$

1.3 地锚式斜拉-悬索协作体系的竖弯频率计算表达式

由能量法可得,地锚式斜拉-悬索协作体系桥的竖弯频率计算表达式为

根据文献[12-14]研究成果,可将式(15)简化为

$$\omega_b^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{H_i^2 l_{s2}}{E_c A_c} + \sum_{i=1}^n \frac{H_i^2 l_{s1}}{E_c A_c} + \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci} v^2}{L_{ci}} \sin^2 \alpha_{ci}}{\int_L (m_c + m_g) \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)^2 dx} \quad (16)$$

2 地锚式协作体系的变形协调方程

地锚式协作体系的一阶竖弯基本振型如图2、图3所示。

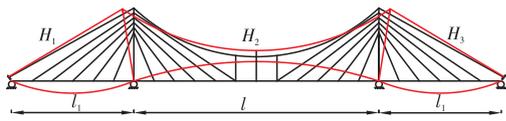


图2 地锚式协作体系的1阶对称竖弯振型

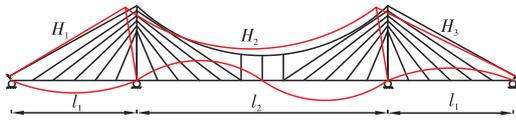


图3 地锚式协作体系的1阶反对称竖弯振型

2.1 地锚式协作体系的1阶对称竖弯变形协调方程

该协作体系做1阶对称竖弯振动时的边、主跨的变形协调方程分别为

$$u_t = \frac{H_1 l_s}{E_c A_c \cos \theta} \quad (17)$$

$$-2u_t = \frac{H_2 l_{ce}}{E_c A_c} - \frac{q}{H_q} \int_{l_2} v dx \quad (18)$$

式中, u_t 为该体系做1阶对称竖弯振动的主塔的位移。

该协作体系做1阶对称振动时,主塔的受力计算图示如图4所示。

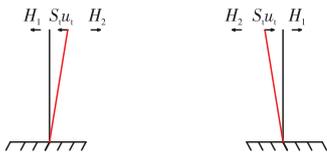


图4 地锚式协作体系1阶对称主塔受力示意图
其力学平衡方程为

$$H_2 - H_1 = S_t u_t \cong \frac{3E_t I_t}{h_t^3} u_t \quad (19)$$

式中, $E_t I_t, h_t$ 为主塔的抗弯刚度、高度。

联立求解式(17)~(19),可得:

$$H_2 = \frac{E_c A_c (S_t l_s + E_c A_c \cos \theta)}{2E_c A_c l_s + S_t l_s l_{ce} + E_c A_c l_{ce} \cos \theta} \frac{q}{H_q} \int_{l_2} v dx \quad (20)$$

$$H_1 = \frac{E_c A_c^2 \cos \theta}{2E_c A_c l_s + S_t l_s l_{ce} + E_c A_c l_{ce} \cos \theta} \frac{q}{H_q} \int_{l_2} v dx \quad (21)$$

2.2 地锚式协作体系的一阶对称竖弯变形协调方程

该协作体系做一阶反对称竖弯振动时的边、主跨变形协调方程分别为:

$$-u_t = \frac{H_1 l_s}{E_c A_c \cos \theta} \quad (22)$$

$$u_t = \frac{H_3 l_s}{E_c A_c \cos \theta} \quad (23)$$

$$0 = \frac{H_2 l_{ce}}{E_c A_c} - \frac{q}{H_q} \int_{l_2} v dx \quad (24)$$

该协作体系做一阶反对称竖弯振动时,主塔的受力如图5所示。

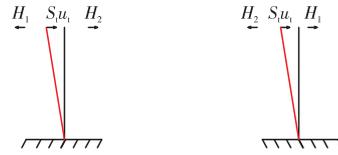


图5 地锚式协作体系1阶竖弯反对称主塔受力示意图

其力学平衡方程为:

$$H_2 + S_t u_t = H_1 \quad (25)$$

$$H_3 + S_t u_t = H_2 \quad (26)$$

联立求解式(22)~(26),可得:

$$H_1 = -\frac{E_c A_c \cos \theta}{E_c A_c \cos \theta + S_t l_s} \frac{E_c A_c q}{l_{ce} H_q} \int_{l_2} v dx \quad (27)$$

$$H_2 = \frac{E_c A_c q}{l_{ce} H_q} \int_{l_2} v dx \quad (28)$$

$$H_3 = \frac{E_c A_c \cos \theta}{E_c A_c \cos \theta + S_t l_s} \frac{E_c A_c q}{l_{ce} H_q} \int_{l_2} v dx \quad (29)$$

3 地锚式协作体系的一阶对称竖弯基频计算式

加劲梁1阶对称振型关于中跨跨中对称如图2所示,设加劲梁的自由振动振型函数为:

$$v_1 = A_1 \sin \frac{\pi x_1}{l_1} \sin(\omega t + \varphi) \quad x_1 \in (0, l_1) \quad (30)$$

$$v_2 = A_2 \sin \frac{\pi x_2}{l_2} \sin(\omega t + \varphi) \quad x_2 \in (l_1, l_1 + l_2) \quad (31)$$

由于加劲梁的振型函数在桥塔处满足变形协调条件,可得

$$v_1' \Big|_{x_1=l_1} = v_2' \Big|_{x_2=l_1},$$

$$\text{经简化可得 } A_1 = -A_2 \frac{l_1}{l_2} = -kA_2 \quad (32)$$

于是,可得

$$\sum_{i=1}^n \frac{H_i^2 L_{ce}}{E_c A_c} + \sum_{i=1}^n \frac{H_i^2 L_{se}}{E_c A_c} = 4A_2^2 \lambda E_c A_c \quad (33)$$

式中: λ 为主塔刚度影响系数。

$$\frac{1}{l_{ce}} = \frac{2kE_c A_c l_c + kS_l l_{ce} + E_c A_c l_{ce}}{S_l l_s + E_c A_c \cos\theta} \quad (34)$$

$$\frac{1}{l_{se}} = \frac{2kE_c A_c l_c + kS_l l_{ce} + E_c A_c l_{ce}}{E_c A_c \cos\theta} \quad (35)$$

$$\lambda = \left(\frac{l_c}{\pi}\right)^2 \left(\frac{8f_c}{l_c^2}\right)^2 \left(\frac{l_{ce}}{l_{ce}^2} + 2\frac{l_{se}}{l_{se}^2}\right) \quad (36)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci} v^2}{L_{ci}} \sin^2 \alpha_{ci} = A_2^2 \left(2k^2 \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci} \sin^2 a_{ci}}{L_{ci}} \sin^2 \frac{\pi x}{l_1} + \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci} \sin^2 a_{ci}}{L_{ci}} \sin^2 \frac{\pi x}{l_2}\right) \quad (37)$$

$$(m_c + m_g) \int_L \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)^2 dx = (m_c + m_g) A_2^2 l_2 \left(k^3 + \frac{1}{2}\right) \quad (38)$$

将式(33)—(38)代入式(16),可得其一阶反对称基频的计算式为

$$\omega_b^2 = \frac{4\lambda E_c A_c + 2k^2 \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci} \sin^2 a_{ci}}{L_{ci}} \sin^2 \frac{\pi x}{l_1} + \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci} \sin^2 a_{ci}}{L_{ci}} \sin^2 \frac{\pi x}{l_2}}{(m_c + m_g) l_2 \left(k^3 + \frac{1}{2}\right)} \quad (39)$$

4 地锚式协作体系的一阶反对称竖弯频率计算式

加劲梁一阶反对称振型关于中跨跨中反对称如图3所示,设其加劲梁的自由振动振型函数分别为:

$$v_1 = A_1 \sin \frac{\pi x_1}{l_1} \sin(\omega t + \varphi) \quad x_1 \in (0, l_1) \quad (40)$$

$$v_2 = A_2 \sin \frac{2\pi x_2}{l_2} \sin(\omega t + \varphi) \quad x_2 \in (l_1, l_1 + l_2) \quad (41)$$

由于加劲梁的竖弯振型函数在桥塔处满足变形协调条件,可得 $v_1' \big|_{x_1=l_1} = v_2' \big|_{x_2=l_1}$,

$$\text{经简化可得 } A_1 = -2A_2 \frac{l_1}{l_2} = -2kA_2 \quad (42)$$

于是,可得:

$$\sum_{i=1}^n \frac{H_i^2 l_{ce}}{E_c A_c} + \sum_{i=1}^n \frac{H_i^2 l_{se}}{E_c A_c} = 0 \quad (43)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci} v^2}{L_{ci}} \sin^2 \alpha_{ci} = A_2^2 \left(8k^2 \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci} \sin^2 a_{ci}}{L_{ci}} \sin^2 \frac{\pi x}{l_1} + \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci} \sin^2 a_{ci}}{L_{ci}} \sin^2 \frac{2\pi x}{l_2}\right) \quad (44)$$

$$(m_c + m_g) \int_L \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)^2 dx = A_2^2 (m_c + m_g) l_2 \left(4k^3 + \frac{1}{2}\right) \quad (45)$$

将式(43)—(45)代入式(16),可得其一阶反对称竖弯基频的计算式为

$$\omega_b^2 = \left(8k^2 \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci} \sin^2 a_{ci}}{L_{ci}} \sin^2 \frac{\pi x}{l_1} + \sum_{i=1}^n \frac{E_{ci} A_{ci} \sin^2 a_{ci}}{L_{ci}} \sin^2 \frac{2\pi x}{l_2}\right) \div \left[(m_c + m_g) l_2 \left(4k^3 + \frac{1}{2}\right)\right] \quad (46)$$

5 算例分析

为验证本文解的计算精度,本文以文献[14]中的算例为例进行校核。该桥跨径布置为 319 m + 1 400 m + 319 m。结构计算参数及计算结果如表1、2所示。

表1 结构计算参数

构件	$E/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	A/m^2	I/m^4	$Q/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
主塔	3.3×10^7	30.000	320.000	2.60×10^3
斜拉索	2.0×10^8	0.008	0	7.85×10^3
加劲梁	2.1×10^8	1.248 1	1.984 2	14.73×10^3
吊索	2.0×10^8	0.006 4	0	7.85×10^3
主缆	2.0×10^8	0.316 7	0	8.40×10^3

表2 不同计算方法结果比较

结构体系	振型	固有频率 ω/Hz			误差
		文献[14]解	理论解1	理论解2	
协作体系	f_{vh}^s	0.203 2	0.193 8	0.184 6	4.63/9.15
	f_{vh}^{as}	0.136 0	0.127 3	0.127 3	6.40/6.40
悬索桥	f_{vs}^s	0.188 0	0.179 2	0.169 7	4.68/9.73
	f_{vs}^{as}	0.134 9	0.125 1	0.125 1	7.26/7.26

注:“/”前为文献[14]与理论解1的误差,理论解1为计入主塔抗弯刚度的结构体系的竖弯基频;“/”后为文献[14]与理论解2的误差,理论解2为未计入主塔抗弯刚度的竖弯基频

算例分析表明,在计入主塔抗弯刚度影响下,理论解1法与文献[14]法计算得到的该体系的竖弯振动基频的计算误差在5%左右;在未计入主塔抗弯刚度影响下,理论解2与文献[14]解之间的误差最大为9.15%。存在上述误差的根本原因是该协作体系的实际振型函数与本文假设的加劲梁的振型函数存在一定差异造成的;理论解1的对称竖弯基频计算精度相对理论解2的计算精度要高,其原因在于理论解1中计入主塔纵向抗弯刚度的影响。同时不难发现,该协作体系的基频比同等跨径布置的悬索体系的基频略大,其原因在于在协作体系中,计入拉索对结构体系的影响。

6 结论

1) 地锚式协作体系桥梁竖向弯曲振动动力特

性是由缆索结构决定的。该体系的竖向弯曲振动基频较同等跨径布置的地锚式悬索桥的竖弯弯曲基频要略大,其原因在于斜拉索对该协作体系的刚度的贡献。

2) 本文利用加劲梁自由振动的振型函数在桥塔处满足变形协调条件,采用能量法推导了该协作体系的竖弯振动频率估算实用公式,此式可用于该协作体系桥梁在初步设计阶段选取合理的计算参数或对数值计算结果进行复核。

3) 本文所推导的竖弯振动基频估算实用公式仅仅适用于三跨连续支承体系的地锚式协作体系桥梁的竖弯基频估算,对其他协作体系的竖弯振动基频估算并不适用。为进一步提高所推导的计算公式的计算精度,在后续的研究中可考虑纵飘振动对竖弯振动的影响,以便提高计算精度。

参 考 文 献

[1] BRUNO D, GRECO F, LONETTI P. A parametric study on the dynamic behavior of combined cable-stayed and suspension bridges under moving loads[J]. International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 2009, 10: 243 - 258.

[2] FEN D, SUN H, FENG M Q. Simultaneous identification of bridge structural parameters and vehicle loads[J]. Computer and Structure, 2015, 157: 76 - 88.

[3] LIU M F, CHANG T P, ZENG D Y. The interactive vibration behavior in a suspension bridge system under moving vehicle loads and

vertical seismic excitations[J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 35(1): 398 - 411.

[4] KONSTANTAKOPOULOS T, Raftoyiannis I G, Michaltsos G T. Suspended bridges subjected to earthquake and moving loads[J]. Engineering Structures, 2012, 45: 223 - 237.

[5] WESTGATE R, KOO K Y, BROWNJOHN J, et al. Suspension bridge response due to extreme vehicle loads[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2014, 10(10): 821 - 833.

[6] LONETTI P, PASCUZZO A. Design analysis of the optimum configuration of self-anchored cable-stayed suspension bridges[J]. Structural Engineering and Mechanics, 2014, 51(5): 847 - 866.

[7] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.

[8] 鞠小华, 廖海黎, 沈锐利. 对悬索桥对称竖弯基频近似公式的修正[J]. 土木工程学报, 2002, 2(1): 44 - 49.

[9] 刘斌. 三塔悬索桥振动特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.

[10] 姜洋. 三塔悬索桥结构体系及施工过程关键问题研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.

[11] 王本劲, 马如进, 陈艾荣. 多塔连跨悬索桥基频估算实用公式[J]. 公路交通科技, 2012, 29(11): 58 - 62.

[12] 肖汝诚, 项海帆. 斜拉-悬索协作体系桥力学特性及其经济性能研究[J]. 中国公路学报, 1999, 12(3): 43 - 48.

[13] 曾攀, 钟铁毅, 闫贵平. 大跨径斜拉-悬索协作体系桥动力特性分析[J]. 计算力学学报, 2002, 19(4): 472 - 476.

[14] 张新军, 孙炳楠, 陈艾荣. 斜拉-悬索协作体系桥的颤振稳定性研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(7): 106 - 110.

(编校: 叶超)

(上接第18页)

[5] 叶爱君, 张喜刚, 刘伟岸. 河床冲刷深度变化对大型桩基桥梁地震反应的影响[J]. 土木工程学报, 2007(3): 58 - 62.

[6] 梁发云, 刘兵, 李静茹. 考虑冲刷作用效应桥梁桩基地震易损性分析[J]. 地震工程学报, 2017, 39(1): 13 - 19, 79.

[7] 商宇, 叶爱君, 王晓伟. 冲刷条件下的桩基桥梁振动台试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 280 - 289.

[8] 杨延凯, 马如进, 陈艾荣. 冲刷作用对大跨度自锚式悬索桥

地震响应的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31(5): 778 - 786.

[9] JTG D63—2007 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

[10] JTG/T B02 - 01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.

(编校: 叶超)