

波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的扭转振动频率分析*

冀伟¹, 蔺鹏臻¹, 邓露², 刘世忠¹, 李爱军¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院 兰州, 730070) (2. 湖南大学土木工程学院 长沙, 410082)

摘要 为精确计算波形钢腹板预应力混凝土 (prestressed concrete, 简称 PC) 简支箱梁桥的扭转振动频率, 在考虑箱梁自由扭转扭矩与约束扭转扭矩的基础上, 运用 D'Alembert 原理推导了波形钢腹板 PC 箱梁桥的扭转振动频率方程, 给出了与该桥型扭转振动频率求解相关的极惯性矩、扭转常数及扇形惯性矩的计算方法, 并根据简支梁的边界条件求得了该桥型扭转振动频率的计算公式。制作了波形钢腹板 PC 简支试验梁, 对其进行了动力特性测试获得自振频率和振型, 在建立试验梁的 ANSYS 有限元模型时提出波形钢腹板与混凝土翼板实现刚性连接的方法, 结合试验梁的实测值和有限元计算值验证了波形钢腹板 PC 简支箱梁桥扭转振动频率计算公式的正确性。分析了自由扭转扭矩和约束扭转扭矩单独作用时对波形钢腹板 PC 简支箱梁桥扭转振动频率的影响, 研究表明, 约束扭转扭矩对其扭转振动频率的影响较大, 而自由扭转扭矩对其扭转振动频率的影响很小。

关键词 波形钢腹板; 组合箱梁; 扭转振动频率; 模型试验; 有限元分析

中图分类号 U448.21⁺6; TH113.1

引言

波形钢腹板 PC 箱梁桥是一种新型的钢-混组合桥梁结构, 其特点是以 10mm 左右厚的波形钢腹板取代 30~80mm 厚的混凝土腹板^[1], 通过体内和体外预应力筋对梁体施加预应力。该桥型大幅度减轻了梁体的自重, 提高了梁体的预应力施加效率。由于波形钢腹板的特殊构造, 其抗剪强度较平腹钢板有较大提高。由于该桥型具有诸多优点, 在国内外桥梁建设中得到了广泛应用。

目前, 国内外学者对波形钢腹板 I 型钢梁和波形钢腹板 PC 箱梁桥静力学性能方面的研究较多。Hassanein 等^[2]研究了波形钢腹板 I 型钢梁的剪切屈曲性能。Oh 等^[3]研究了波形钢腹板的手风琴效应对其力学性能的影响。Jäger 等^[4]研究了波形钢腹板 I 型钢梁在弯矩、剪力及局部荷载作用下的力学行为。Kövesdi 等^[5]研究了波形钢腹板 I 型钢梁翼缘板的应力分布。Lee 等^[6]研究了体外预应力筋的布置、焊接方式及剪力连接件对波形钢腹板 I 型组合梁结构性能的影响。江克斌等^[7]研究了波形钢腹板 PC 箱梁在扭转作用下的力学行为。刘保东

等^[8]对波形钢腹板 PC 箱梁桥的挠度计算问题进行了分析。聂建国等^[9]研究了波形钢腹板剪切变形对波形钢腹板组合梁力学行为的影响。文献[10-11]虽然在波形钢腹板 PC 箱梁桥动力特性方面取得一些研究成果, 但主要针对其弯曲振动特性, 对扭转振动特性方面的研究相对滞后^[12]。文献[12]并未给出与波形钢腹板 PC 箱梁扭转振动频率计算相关的极惯性矩、扭转常数及扇形惯性矩的计算方法。波形钢腹板 PC 箱梁桥以波形钢板作为其腹板, 相对传统的 PC 箱梁其腹板较薄, 抗扭刚度受到较大削弱, 使得该桥型在动力荷载作用下的扭转振动处于不利状态。因此, 对波形钢腹板 PC 箱梁桥的扭转振动进行研究具有现实意义。

为精确计算波形钢腹板 PC 箱梁桥的扭转振动频率, 笔者给出了与其扭转振动频率计算相关的极惯性矩、扭转常数及扇形惯性矩的计算方法。在考虑箱梁自由扭转扭矩和约束扭转扭矩的基础上, 运用 D'Alembert 原理推导了波形钢腹板 PC 箱梁桥扭转振动的频率方程。为求得波形钢腹板 PC 简支箱梁桥扭转振动频率方程的解, 根据其边界条件得到扭转振动频率方程的特解, 将特解代入扭转振动频率方程, 获得波形钢腹板 PC 简支箱梁桥扭转振

* 国家自然科学基金资助项目(51368032); 中国博士后科学基金资助项目(2014M562103); 甘肃省高等学校科研资助项目(2015A-053); 兰州交通大学优秀平台资助项目(201601)

收稿日期: 2015-12-16; 修回日期: 2016-04-06

动频率的计算公式,模型试验和有限元方法也验证了计算公式的正确性。

1 箱梁的扭转振动理论

为分析箱梁的扭转振动,取如图1所示的箱梁和坐标系,箱梁的壁厚为 t ,在扭矩 T 作用下,距离梁端 x 处的箱梁截面发生扭转角 ϕ 时,得到其微元体 dx 的受力图^[13],如图2所示。

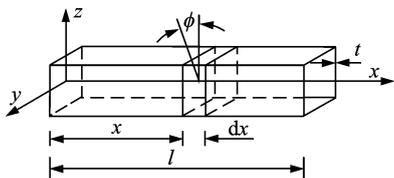


图1 梁的坐标系及扭转角示意图

Fig. 1 Coordinate system and torsion rotation angle of the girder

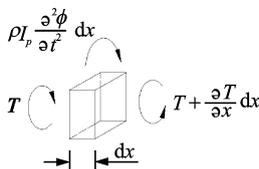


图2 梁的微元体受力示意图

Fig. 2 Force acting on the element

根据微元体受力图,运用 D'Alembert 原理得到箱梁扭转振动的平衡方程为

$$T + \frac{\partial T}{\partial x} dx - T - \rho I_p \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} dx = 0 \quad (1)$$

其中: T 为梁所受的扭矩; ϕ 为梁截面的扭转角; ρ 为梁的质量密度; I_p 为梁截面的极惯性矩。

化简式(1)可得

$$\frac{\partial T}{\partial x} - \rho I_p \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

在一般情况下,薄壁杆件受扭后,杆件轮廓线上各点不仅在平面内产生相对位移,而且出平面产生翘曲(凹凸)。使杆件轮廓线上各点自由翘曲的扭转称作自由扭转或圣维南扭转,若其横截面的纵向翘曲受到约束(或阻碍),此类扭转称为约束扭转^[14]。如图3所示的简支箱梁,边界条件一端为固定铰支座,另一端为活动铰支座。

当简支箱梁发生扭转振动时,其横截面的纵向翘曲受到约束,会同时产生自由扭转扭矩 M_t 和约束扭转扭矩 M_w ^[14],计算公式分别为

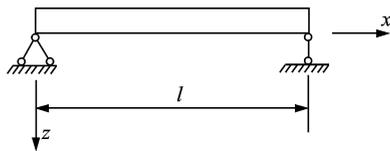


图3 简支梁的边界条件

Fig. 3 Boundary conditions of simply supported beam

$$M_t = GI_t \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (3)$$

$$M_w = -EI_w \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \quad (4)$$

其中: E 和 G 分别为材料的弹性模量和剪切模量; I_t 和 I_w 分别为截面的扭转常数和扇形惯性矩。

总扭矩 T 为自由扭转扭矩 M_t 和约束扭转扭矩 M_w 的代数和^[14],可表示为

$$T = M_t + M_w = GI_t \frac{\partial \phi}{\partial x} - EI_w \frac{\partial^3 \phi}{\partial x^3} \quad (5)$$

将式(5)代入式(2),得到箱梁考虑自由扭转和约束扭转的振动方程为

$$GI_t \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - EI_w \frac{\partial^4 \phi}{\partial x^4} - \rho I_p \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad (6)$$

设扭转振动曲线 $\phi(x, t)$ 为

$$\phi(x, t) = \bar{\phi}_n(x) \sin(\omega t + d) \quad (7)$$

其中: $\bar{\phi}_n$ 为箱梁扭转振动的振型函数; ω 为扭转振动圆频率; d 为初始相位角。

将式(7)代入式(6),可得

$$-EI_w \frac{\partial^4 \bar{\phi}_n(x)}{\partial x^4} + GI_t \frac{\partial^2 \bar{\phi}_n(x)}{\partial x^2} + \omega^2 \rho I_p \bar{\phi}_n(x) = 0 \quad (8)$$

振型函数的解^[15]可表达为

$$\bar{\phi}_n(x) = C_1 \sin(\lambda x) + C_2 \cos(\lambda x) + C_3 \sinh(\lambda x) + C_4 \cosh(\lambda x) \quad (9)$$

其中: C_1, C_2, C_3, C_4 和特征值 λ (相应于自振频率 ω)由梁的边界条件确定。

简支梁的边界条件为

$$\bar{\phi}(0) = \bar{\phi}(l) = \frac{d^2 \bar{\phi}(0)}{dx^2} = \frac{d^2 \bar{\phi}(l)}{dx^2} = 0 \quad (10)$$

满足边界条件的一个特解为

$$\bar{\phi}(x) = \sin\left(\frac{n\pi x}{l}\right) - \frac{\sin\left(\frac{n\pi l}{l}\right)}{\sinh(\lambda l)} \sinh(\lambda x) \quad (11)$$

将式(11)代入式(8),得到简支箱梁扭转振动频率的计算公式为

$$\omega = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{l}\right)^4 \frac{EI_w}{\rho I_p} + \left(\frac{n\pi}{l}\right)^2 \frac{GI_t}{\rho I_p}} \quad (12)$$

2 波形钢腹板 PC 箱梁扭转截面特性

2.1 波形钢腹板的构造与剪切模量修正

波形钢腹板的构造如图 4 所示,波形钢腹板剪切模量的计算值与其波形的几何形状有关^[16],其剪切模量 G_s 的计算公式为

$$G_s = \alpha \frac{E_s}{2(1 + \nu_s)} \quad (13)$$

其中: $\alpha = (L_1 + L_2) / (L_1 + L_3)$ 为剪切模量的修正系数; E_s 与 ν_s 分别为钢材的弹性模量和泊松比; L_1 , L_2 与 L_3 分别为平板长度、斜板投影长度及斜板长度。

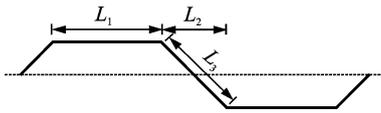


图 4 波形钢腹板的尺寸示意图

Fig. 4 Dimension of corrugation profile

2.2 波形钢腹板 PC 箱梁扭转常数计算

波形钢腹板 PC 箱梁由波形钢腹板与混凝土上、下翼板构成,其扭转常数的计算需要同时考虑两种不同性质材料的组合,如图 5 所示。文献[1]给出波形钢腹板 PC 箱梁扭转常数的计算公式,分别为

$$I_t = 4A_m^2 \left[\frac{h_1}{n_s t_2 (1 + \alpha)} + \frac{b_1}{t_1 (1 - \alpha)} + \frac{b_3}{t_3 (1 - \alpha)} + \frac{h_1}{n_s t_4 (1 + \alpha)} \right] \quad (14)$$

$$\alpha = 0.400h_1/b_1 - 0.060 \quad (15)$$

其中: I_t 为箱梁扭转常数; A_m 为 b_1 和 h_1 所围闭合截面的面积(如图 4 中虚线所示); b_1 为波形钢板中心宽度; h_1 为桥面板中心高度; n_s 为 G_s/G_c , G_c 为混凝土的剪切弹性模量; t_i ($i=1,2,3,4,5$) 为各个构件的平均厚度; α 为修正系数。

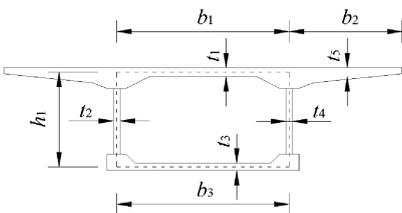


图 5 波形钢腹板 PC 箱梁扭转常数的计算参数

Fig. 5 Calculation parameters of torsion constant for the PC box girder with corrugated steel webs

文献[1]计算波形钢腹板 PC 箱梁扭转常数时,未考虑箱梁上翼板悬臂段对扭转常数的贡献(如图 5 所示的 b_2)。笔者对文献[1]提出的扭转常数计算公式进行了修正,考虑了箱梁悬臂段对扭转常数的贡献,即

$$I_t = 4A_m^2 \left[\frac{b_1}{t_1 (1 - \alpha)} + \frac{h_1}{n_s t_2 (1 + \alpha)} + \frac{b_3}{t_3 (1 - \alpha)} + \frac{h_1}{n_s t_4 (1 + \alpha)} \right] + 2 \frac{1}{3} b_2 t_5^3 \quad (16)$$

2.3 波形钢腹板 PC 箱梁的极惯性计算

波形钢腹板 PC 箱梁的极惯性矩 I_p 的计算需要同时考虑两种不同性质材料的组合,计算方法如式(17)所示。式(18),(19)分别为混凝土翼板和波形钢腹板的极惯性矩 I_{pc} , I_{ps} 的计算公式

$$I_p = I_{pc} + \frac{E_s}{E_c} I_{ps} \quad (17)$$

$$I_{pc} = I_{xc} + I_{yc} \quad (18)$$

$$I_{ps} = I_{xs} + I_{ys} \quad (19)$$

其中: E_c 为混凝土的弹性模量; I_{xc} 和 I_{xs} 分别为混凝土翼板和波形钢腹板的对 x 轴的惯性矩; I_{yc} 和 I_{ys} 分别为混凝土翼板和波形钢腹板的对 y 轴的惯性矩。

2.4 波形钢腹板组合箱梁的扇形惯性矩计算

波形钢腹板 PC 箱梁的扇形惯性矩 I_w 的计算考虑了两种不同性质材料的组合,计算方法为

$$I_w = I_{wx} + \frac{E_s}{E_c} I_{ws} \quad (20)$$

其中: I_{wx} 和 I_{ws} 分别为混凝土翼板和波形钢腹板对波形钢腹板 PC 箱梁扭转中心的扇形惯性矩。

至此,波形钢腹板 PC 箱梁扭转振动频率计算公式中所需要的截面特性已全部给出了计算方法。

3 模型试验梁的制作与动力特性测试

3.1 试验梁的制作

为验证笔者求解波形钢腹板 PC 简支箱梁桥扭转振动频率计算公式的正确性,以所建的波形钢腹板 PC 连续箱梁桥-郟城黄河公路大桥的跨中箱梁截面设计尺寸为依据,按照 1/10 的比例缩尺制作了 6 m 波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的模型试验梁。试验梁的截面尺寸如图 6 所示,试验梁边界条件为梁的一端为活动铰支座,另一端为固定铰支座。试验梁所用混凝土材料 28 天龄期测得的抗压强度平均值为 51.2MPa,按 JTG D62-2004《公路钢筋混凝土

土及预应力混凝土桥涵设计规范》的规定为 C50 混凝土,其弹性模量和泊松比按规范规定取值。

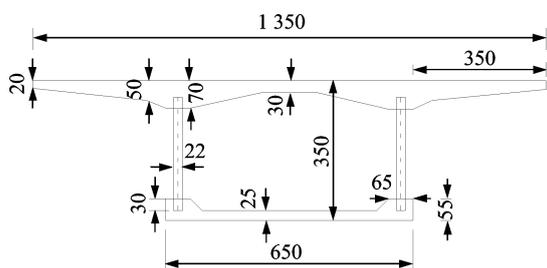


图 6 箱梁截面的基本尺寸(单位: mm)

Fig. 6 Main dimensions of model (unit: mm)

采用 Q235 钢板在工厂制作完成试验梁的波形钢腹板,截面尺寸示意图如图 7 所示。弹性模量和泊松比分别为 206GPa 和 0.3。制作好的室内试验梁模型如图 8 所示。

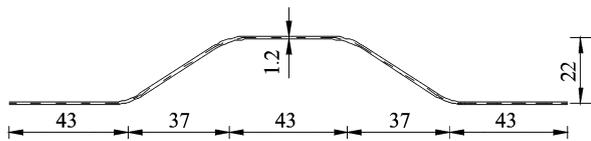


图 7 波形钢腹板尺寸(单位: mm)

Fig. 7 Dimensions of corrugated steel web (unit: mm)



图 8 模型试验梁

Fig. 8 Test girder model

3.2 动力测试

选用自振法测试试验梁的自振频率和振型,使用突然加载与突然卸载的方式使梁体产生自由振动。本试验采取力锤敲击的方式进行突然加载,激励点和测点的布置如图 9 所示,采样频率为 512Hz。

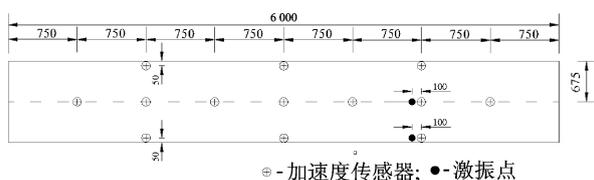


图 9 顶板传感器布置图(单位: mm)

Fig. 9 Measurement locations on the bridge deck in the modal test (unit: mm)

实际敲击时敲击点位置不动,把传感器放置在指定测点上,对每个位置记录激励信号(力锤冲击力)和梁体响应信号,将测试得到的信号输入东华 DH-DAS 信号测试分析系统软件进行分析,完成室内模型试验梁的自振频率测试和振型识别。

4 波形钢腹板 PC 箱梁桥的三维有限元模型

采用 ANSYS 14.0 有限元分析软件建立了波形钢腹板 PC 箱梁桥的有限元模型。根据波形钢腹板 PC 箱梁桥的特点,采用实体单元、壳单元及杆单元 3 种不同的单元模拟其空间结构。波形钢腹板 PC 组合箱梁的上、下翼板及横隔板均为钢筋混凝土结构,采用实体单元 Solid45 来建立;采用壳单元 Shell63 模拟波形钢腹板;采用 Link8 单元模拟波形钢腹板 PC 箱梁桥的体外预应力筋,通过设置初应变的方法施加预应力。波形钢腹板与混凝土上、下翼板的连接处采用刚性连接,即波形钢腹板的节点与翼板的节点在相应位置处耦合竖向、横向及纵向自由度,形成刚性连接,如图 10 所示。

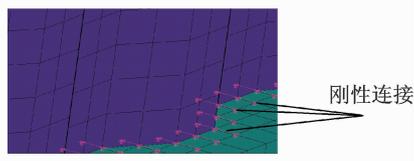


图 10 波形钢腹板与混凝土翼板的连接

Fig. 10 Connection between the corrugated steel webs and concrete flange

波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的边界条件为梁端一端为活动铰支座,约束梁体的竖向和横向两个方向的位移;另一端为固定铰支座,约束梁体的竖向、纵向和横向 3 个方向的位移。建立完成的波形钢腹板 PC 简支箱梁桥的有限元模型如图 11 所示。

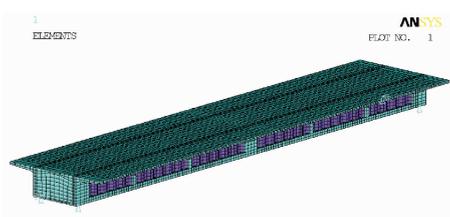


图 11 波形钢腹板 PC 箱梁桥的有限元模型

Fig. 11 Finite element model of the PC box girder bridge with corrugated steel webs

5 计算结果对比分析

将试验梁动力特性测试获得的实测频率值和振型采用 ANSYS 有限元软件计算所得的试验梁频率值和振型与本研究所得的试验梁扭转振动频率值进行对比分析,结果如表 1 所示。

表 1 模型试验梁的自振频率和振型对比

Tab. 1 Comparison of natural frequencies and mode shapes for the test girder

频率阶数	ANSYS 计算值/ Hz	实测值/ Hz	本计算 公式值/ Hz	振型描述
1	18.06	19.20	—	弯曲振动
2	39.23	—	—	横向振动
3	52.42	55.64	—	弯曲振动
4	65.38	67.81	65.17	扭转振动
5	67.79	—	—	弯曲振动
6	109.42	—	—	弯曲振动
7	134.12	—	131.13	扭转振动

由表 1 可以看出,本计算公式所得的扭转振动频率值与实测值及有限元值吻合良好,可以用于实际工程中波形钢腹板 PC 简支箱梁桥扭转振动频率的计算。

为了对比分析自由扭转扭矩和约束扭转扭矩各自对波形钢腹板 PC 简支箱梁桥扭转振动频率的影响,在式(12)中计算了两种扭矩单独作用下产生的扭转振动频率值,如表 2 所示。可以看出,在约束扭转扭矩单独作用下,计算所得的波形钢腹板 PC 简支箱梁桥扭转振动频率值与总频率值较为接近,而在自由扭转扭矩单独作用下得到的扭转振动频率值与总频率值相差较大,说明约束扭转扭矩对波形钢腹板 PC 简支箱梁桥扭转振动频率的影响较大,而自由扭转扭矩对其扭转振动频率的影响很小。

表 2 自由扭转扭矩与约束扭转扭矩产生的扭转振动频率对比

Tab. 2 Comparison of torsional vibration frequencies between the Saint-Venant torque and warping torque

扭转振动频率阶数	仅考虑自由 扭转扭矩所得 频率/Hz	仅考虑约束 扭转扭矩所得 频率/Hz	总频率/Hz
1	4.16	65.03	65.17
2	16.66	130.07	131.13

6 结 论

1) 本研究所得的波形钢腹板 PC 简支箱梁桥扭转振动频率计算公式的正确性得到了实测值和有限元计算值的验证,可以用于实际工程中波形钢腹板 PC 简支箱梁桥扭转振动频率的计算。

2) 提出的波形钢腹板 PC 箱梁的极惯性矩、扭转常数及扇形惯性矩的计算方法可以用于该桥型箱梁扭转截面特性的计算。

3) 在建立波形钢腹板 PC 箱梁桥的 ANSYS 有限元模型时,笔者提出的在波形钢腹板与混凝土翼板的交界处耦合竖向、横向及纵向自由度,形成刚性连接的方法更符合实际情况,计算所得的频率值与实测值吻合良好。

4) 约束扭转扭矩对波形钢腹板 PC 简支箱梁桥扭转振动频率的影响较大,而自由扭转扭矩对其扭转振动频率的影响很小,可忽略不计。

参 考 文 献

[1] 陈宜言. 波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 1-4.

[2] Hassanein M F, Kharooob O F. Shear buckling behavior of tapered bridge girders with steel corrugated webs [J]. Engineering Structures, 2014, 74: 157-169.

[3] Oh J Y, Lee D H, Kim K S. Accordion effect of prestressed steel beams with corrugated webs [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 57: 49-61.

[4] Jáger B, Dunai L, Kövesdi B. Girders with trapezoidally corrugated webs subjected by combination of bending, shear and path loading [J]. Thin-Walled Structures, 2015, 96: 227-239.

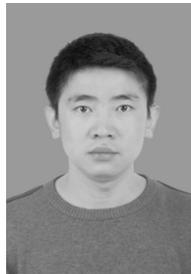
[5] Kövesdi B, Jáger B, Dunai L. Stress distribution in the flanges of girders with corrugated webs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 79: 204-215.

[6] Lee D H, Oh J Y, Kang H, et al. Structural performance of prestressed composite girders with corrugated steel plate webs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 104: 9-21.

[7] 江克斌, 丁勇, 杨建奎, 等. 波形钢腹板 PC 组合箱梁纯扭作用下抗扭承载力试验研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(6): 175-182.

Jiang Kebin, Ding Yong, Yang Jiankui, et al. Experimental study on ultimate torsional strength of PC composite box-girder with corrugated steel webs under

- pure torsion[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(6): 175-182. (in Chinese)
- [8] 刘保东, 任红伟, 李鹏飞. 考虑波纹钢腹板箱梁特点的挠度分析[J]. *中国铁道科学*, 2011, 32(3): 21-26.
Liu Baodong, Ren Hongwei, Li Pengfei. Deflection analysis considering the characteristics of box girder with corrugated steel webs[J]. *China Railway Science*, 2011, 32(3): 21-26. (in Chinese)
- [9] 聂建国, 李法雄, 樊健生. 波形钢腹板梁变形计算的有效刚度法[J]. *工程力学*, 2012, 29(8): 71-79.
Nie Jianguo, Li Faxiong, Fan Jiansheng. Effective stiffness method for calculating deflection of corrugated web girder[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(8): 71-79. (in Chinese)
- [10] 韦忠瑄, 孙鹰, 沈庆, 等. 波形钢腹板 PC 组合箱梁的动力特性研究[J]. *固体力学学报*, 2011, 32: 394-398.
Wei Zhongxuan, Sun Ying, Shen Qing, et al. Study on dynamic properties of the prestressed concrete box-girder with corrugated steel webs[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2011, 32: 394-398. (in Chinese)
- [11] 冀伟, 刘世忠. 波形钢腹板简支箱梁竖向频率的影响因素分析[J]. *振动、测试与诊断*, 2013, 33(6): 1039-1043.
Ji Wei, Liu Shizhong. Influencing factors of vertical frequency of the box beam with corrugated steel webs[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(6): 1039-1043. (in Chinese)
- [12] 任红伟, 刘保东, 陈海波. 波形钢腹板混凝土箱梁的扭转振动分析[J]. *中国公路学报*, 2008, 21(6): 64-68.
Ren Hongwei, Liu Baodong, Chen Haibo. Analysis of torsional vibration of concrete box-girder with corrugated steel webs[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2008, 21(6): 64-68. (in Chinese)
- [13] Timoshenko S, Young D H, Weaver Jr W. *Vibration problems in engineering*[M]. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1974: 474-478.
- [14] 包世华, 周坚. *薄壁杆件结构力学*[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 38-43.
- [15] 克拉夫 R, 彭津 J. *结构动力学*[M]. 王光远, 译. 北京: 高等教育出版社, 2006: 293-300.
- [16] Samanta A, Mukhopadhyay M. Finite element static and dynamic analyses of folded plates[J]. *Engineering Structures*, 1999, 21: 277-287.



第一作者简介: 冀伟, 男, 1982 年 6 月生, 博士、副教授。主要研究方向为桥梁结构设计理论。曾发表《波形钢腹板简支箱梁竖向频率的影响因素分析》(《振动、测试与诊断》2013 年第 33 卷第 6 期) 等论文。

E-mail: jiwel1668@163.com

