

考虑温度和剪切变形的改进型波形钢腹板 组合箱梁动力特性研究

陈雪松¹, 罗奎², 冀伟³, 张经纬⁴, 吴智博², 刘明¹

(1. 辽宁铁道职业技术学院铁道工程学院, 辽宁 锦州 121000; 2. 湖南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410082;
3. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 4. 甘肃恒路交通勘察设计院有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了精确分析温度效应和剪切变形效应对改进型波形钢腹板组合箱梁自振特性的影响, 提出一种考虑温度效应和剪切变形效应的改进型波形钢腹板组合箱梁自振特性分析方法。综合考虑温度、剪切变形和波形钢腹板刚度修正的影响, 运用应力等效原则推导出改进型波形钢腹板组合箱梁的自振频率解析公式; 利用实桥 ANSYS 有限元分析结果和试验实测结果对自振频率解析公式的正确性进行了验证; 分析了温度等效轴向偏心力变化、弹性模量变化、剪切变形效应、不同高跨比和不同宽跨比下温度效应对该桥型自振频率的影响。结果表明: 温度效应对改进型波形钢腹板组合箱梁的基频影响较大, 计算该桥型的基频时需要考虑温度效应的影响; 波形钢腹板的剪切变形效应对该桥型自振频率的影响较为显著, 从第 4 阶自振频率开始剪切变形的影响已超过 50%; 不同高跨比下温度效应对基频的影响较大, 且随着高跨比的增大呈线性急剧增大; 不同宽跨比下温度效应对自振频率的影响较小, 可以忽略不计。研究成果可为改进型波形钢腹板组合箱梁的自振频率计算和分析提供参考依据。

关键词: 组合箱梁; 波形钢腹板; 温度效应; 剪切变形; 模态试验; 自振频率

中图分类号: U441⁺.3; U448.21⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2024)04-0601-11

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2024.04.007

1 概述

1975 年法国学者 Pierre Thivans 首次提出了波形钢腹板组合箱梁^[1](简称 CBGCSW)。与传统的混凝土箱梁相比, CBGCSW 用波形钢腹板替代了混凝土腹板, 其具有自重轻、预应力导入率高、剪力弯矩分配合理等优点, 在国内外桥梁建设中得到了广泛应用。

国内外学者针对 CBGCSW 的研究主要集中在弯曲性能^[2-4]、剪切屈曲^[5-7]和扭转性能^[8-9]上。此外, 也有很多学者对 CBGCSW 的动力特性进行了研究。关于剪切变形、剪力滞效应和滑移效应对 CBGCSW 自振特性的影响方面, 张永健等^[10]利用能量变分原理推导了 CBGCSW 的自振频率计算公式, 并通过试验实测结果对公式的正确性进行了验证; Cao 等^[11]利用 Hamilton 原理推导出 CBGCSW 的振动频率公式, 通过 ANSYS 有限元分析结果对公式的准确性和适用性进行了验证, 并分析了剪切变形

和剪力滞效应对振动频率的影响; Ji 等^[12]考虑剪切剪滞双重效应, 运用 Hamilton 原理推导出 CBGCSW 的自振频率计算公式, 结果表明波形钢腹板的剪切变形对自振频率的影响较大; Yang 等^[13]考虑剪力滞和波形钢腹板的剪切变形效应推导出波形钢腹板槽形梁的自振频率公式, 并分析了跨度、底板宽度和波形钢腹板型号对自振频率的影响; Jiang 等^[14]研究了滑移效应对自振频率的影响, 结果表明滑移效应对自振频率的影响高达 13.7%; Zhu 等^[15]研究了界面滑移和剪力滞效应对自振频率的影响; Feng 等^[16]分析了剪切变形和层间滑移效应对 CBGCSW 动力特性的影响。关于体外预应力对 CBGCSW 自振特性的影响方面, 郑尚敏等^[17]研究了体外预应力对 CBGCSW 自振频率的影响; 李志聪^[18]将模型试验梁的实测结果和有限元结果进行对比分析, 研究表明实际工程中可以忽略体外预应力对自振特性的影响。此外, 也有学者对 CBGCSW 的扭转自振特性进行了研究, 石锦光^[19]和张均洁^[20]通过对自振特性进行实测, 证明了扭转刚度小于纵向弯曲刚度。

收稿日期: 2022-06-02; **修订日期:** 2022-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51708269); 甘肃省自然科学基金资助项目(21JR7RA315); 兰州市人才创新创业项目(2021-RC-39); 陇原青年创新创业人才(团队)项目; 兰州交通大学“百名青年优秀人才培养计划”资助项目。

为了进一步减轻CBGCSW的自重,提高耐久性,Nie等^[21]提出了一种改进型波形钢腹板组合箱梁(简称ICBGCSW),如图1所示。将CBGCSW的混凝土底板用带有纵向加劲肋的钢底板替代,有效避免了混凝土底板易开裂的弊病。Ma等^[22]利用能量变分原理推导出ICBGCSW的挠度理论解,并研究了宽跨比对该桥型挠度的影响。冀伟等^[23-25]和文献^[26-28]考虑箱梁的剪力滞效应和波形钢腹板的剪切变形,利用势能驻值原理推导了ICBGCSW的单元刚度矩阵和单元质量矩阵,通过MATLAB自编程序对ICBGCSW的自振特性进行了分析,为该桥型的自振特性分析提供了一种简化分析方法。

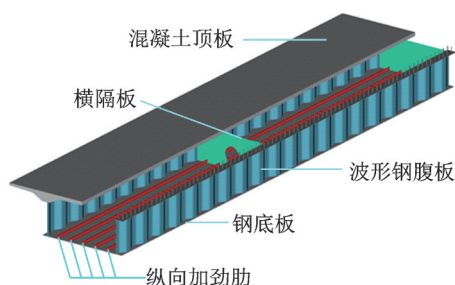


图1 改进型波形钢腹板组合箱梁构造图
Fig. 1 Construction diagram of ICBGCSW

根据文献调研可知,现有文献主要研究了剪力滞效应、剪切变形效应、滑移效应和体外预应力对ICBGCSW自振特性的影响,但很少有学者研究温度效应对ICBGCSW自振特性的影响。而桥梁长期处于日照条件下会产生不均匀温度场,温度效应对自振特性产生一定程度的影响,因此本文提出了一种考虑温度效应和剪切变形效应的ICBGCSW自振特性分析方法。首先,综合考虑温度、剪切变形以及波形钢腹板刚度修正的影响,运用应力等效原则推导出ICBGCSW的自振频率解析公式;其次,利用实桥ANSYS有限元分析结果和试验实测结果对自振频率解析公式的正确性进行了验证;最后,分析了温度等效轴向偏心力变化、弹性模量变化、剪切变形效应、不同高跨比和不同宽跨比下温度效应对ICBGCSW自振频率的影响。研究成果可为ICBGCSW的自振频率计算和分析提供参考依据。

2 自由振动方程的建立

2.1 基本假定

考虑温度效应和波形钢腹板的剪切变形效应推导ICBGCSW的自振频率计算公式时,做出以下基本假定:

(1) 温度沿ICBGCSW的纵向变化幅度很小,

忽略温度沿梁纵向的影响;

(2) 假定混凝土和钢材均为均质材料,应力、应变呈线性关系;

(3) 假定ICBGCSW在弹性范围内工作,满足“拟平截面假定”;

(4) 忽略钢材与混凝土材料之间的层间滑移效应。

2.2 波形钢腹板剪切模量的修正

计算波形钢腹板的剪切应变时,根据文献^[28]对钢材的剪切模量进行修正,如下式所示:

$$G_w = \frac{D_1 + D_2}{D_1 + D_3} \frac{E_s}{2(1 + \mu_s)} \quad (1)$$

式中 D_1, D_2 和 D_3 分别为波形钢腹板的斜板段水平投影长度、平板段长度和斜板段长度; E_s 和 μ_s 分别为钢材的弹性模量和泊松比。波形钢腹板的几何构造如图2所示。

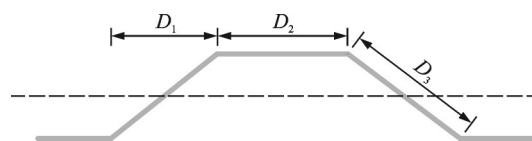


图2 波形钢腹板的几何构造

Fig. 2 Geometric construction of corrugated steel webs

2.3 温度自应力的计算

温度梯度分为线性和非线性两种^[29],线性温度梯度下,ICBGCSW发生弯曲变形;非线性温度梯度下,纵向纤维层需抵抗因温度产生的变形,产生约束力,即温度自应力,如图3所示。图中, y_c 为坐标原点与截面形心轴的间距; $b(y)$ 为高度 y 处的截面宽度。

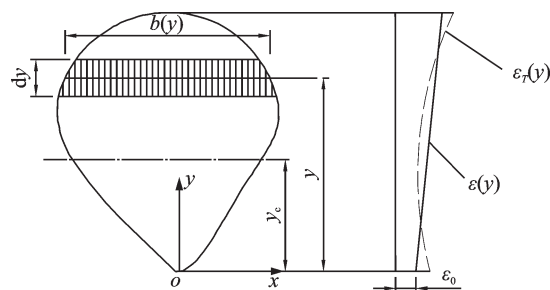


图3 非线性温度梯度下的温度自应力

Fig. 3 Temperature self stress under nonlinear temperature gradient

由图3可知,温度自应变如下式所示:

$$\epsilon_s(y) = \epsilon_T(y) - \epsilon(y) \quad (2)$$

式中 $\epsilon_s(y)$ 为温度自应变; $\epsilon_T(y)$ 为ICBGCSW在完全自由状态下的应变; $\epsilon(y)$ 为ICBGCSW在受约束时所产生的应变。

$$\epsilon(y) = \epsilon_0 + y \tan \varphi = \epsilon_0 + y\varphi \quad (3)$$

$$\epsilon_T(y) = \alpha_T(y)T(y) \quad (4)$$

式中 α_T 为材料的线性膨胀系数; ϵ_0 为 ICBGCSW 的高度为 0 处的初始应变; φ 为截面的变形曲率; $T(y)$ 为沿梁高方向的温度梯度曲线。

ICBGCSW 的混凝土顶板、波形钢腹板^[30]和钢底板^[31]的温度分布函数分别如下式所示:

$$T_1(y) = -0.0091(h - y) + (T + 0.546) \quad (5)$$

$$T_2(y) = 1.6399e^{-0.002(1.5-y)} + T \quad (6)$$

$$T_3(y) = T_d + T_0e^{-a(h-y)} \quad (7)$$

式中 h 为梁高; T_d 为 ICBGCSW 底部的温度值; T_0 为 ICBGCSW 底部和顶部的温度差值; a 为指数系数, 根据文献[31]取值为 5。

ICBGCSW 的温度自应力为:

$$\sigma_s(y) = E\epsilon_s(y) = E[\alpha_T(y)T(y) - (\epsilon_0 + y\varphi)] \quad (8)$$

式中 E 为材料的弹性模量。

ICBGCSW 截面上的总轴力和总弯矩分别如下式所示:

$$N = \sigma_s(y)A_s \quad (9)$$

$$M = \sigma_s(y)A_s(y - y_0) \quad (10)$$

式中 $A_s = \int_0^H b(y)dy$, 其中 H 为梁高; y_0 为梁底到形心轴的距离。

根据温度自应力的特性可知, 在简支梁中, 当 N 和 M 均为 0 时, 联立式(8)~(10)可得 φ 和 ϵ_0 , 分别如下式所示:

$$\varphi = \frac{\alpha}{I} \int_0^H T(y)b(y)(y - y_0)dy \quad (11)$$

$$\epsilon_0 = \frac{\alpha}{A_s} \int_0^H T(y)b(y)dy - \varphi y_0 \quad (12)$$

式中 α 为线性膨胀系数; I 为截面惯性矩。

ICBGCSW 截面的实际变形可以假设为作用在形心位置处的轴力和弯矩。等效轴力和等效弯矩分别如下式所示:

$$P_e = EA_s(\epsilon_0 + \varphi y_0) \quad (13)$$

$$M_e = EI\varphi \quad (14)$$

将等效轴力和等效弯矩假设为偏心力 P_0 作用在 ICBGCSW 的两端, 如图 4 所示。

ICBGCSW 的轴力随振动发生变化:

$$P_e = P_0 + \Delta P \quad (15)$$

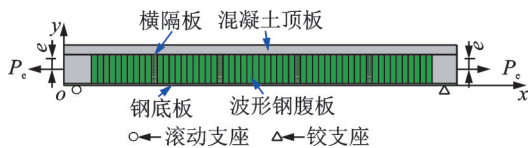


图 4 等效内力

Fig. 4 Equivalent inner force

$$M_e = (P_0 + \Delta P)e \quad (16)$$

式中 ΔP 为轴力的改变值; e 为偏心距。

温度效应除导致温度自应力的产生外, 还导致材料弹性模量的改变, 混凝土弹性模量与所处环境温度之间的关系^[32]为:

$$E_c = E_{c20}[1 - \theta_E(T - 20)] \quad (17)$$

式中 E_{c20} 为 20 °C 时混凝土的弹性模量; θ_E 为混凝土弹性模量的变异系数, 根据文献[32] θ_E 取 4.5×10^{-3} 。

钢材的弹性模量与温度间的关系^[33]为:

$$E_s = E_{s20}(-3 \times 10^{-9}T^3 + 7 \times 10^{-7}T^2 - 1 \times 10^{-4}T + 1) \quad (18)$$

式中 E_{s20} 为 20 °C 时钢材的弹性模量。

2.4 振动微分方程的建立与求解

当 ICBGCSW 发生自由振动时, 根据 Euler-Bernoulli 梁理论, 可知 ICBGCSW 的振动微分方程如下式所示:

$$EI_D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \frac{\partial^2 (P_e w)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (M_e)}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (19)$$

式中 I_D 为等效惯性矩; m 为单位长度质量。

在 x 方向上不发生变化, 故:

$$\frac{\partial^2 P_0}{\partial x^2} = 0 \quad (20)$$

偏心距 e 远大于振动位移 w , 式(19)可改写成下式:

$$EI_D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \frac{\partial^2 (P_0 w)}{\partial x^2} + e \frac{\partial^2 (\Delta P)}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (21)$$

振动位移 w 较小, 可以用 ICBGCSW 跨中的位移 y 来代替:

$$EI_D \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - \frac{\partial^2 (P_0 y)}{\partial x^2} + e \frac{\partial^2 (\Delta P)}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (22)$$

假设 y 与 ΔP 成正比, 且比值为 k , 即:

$$y = k\Delta P \quad (23)$$

在 ICBGCSW 轴线上作用集中力时, 可以采用图乘法计算支座处的水平位移, 得到的弯矩和轴力图如图 5 所示。

作用单位力 F 时, 其位移如下式所示:

$$\delta_{1p} = \int \frac{M_1 M}{EI_D} dx = \frac{FL^2 e}{8EI_D} \quad (24)$$

式中 M_1 为偏心单位力作用下的弯矩; L 为梁的长度。

当支座上作用单位力 F 时, 其位移如下式所示:

$$\delta_{11} = \int \frac{M_1^2}{EI_D} dx + \int \frac{N_1^2}{EA_s} dx = \frac{e^2 L}{EI_D} + \frac{L}{EA_s} \quad (25)$$

式中 N_1 为单位力 F 作用下的轴力。

ΔP 与支座的水平位移成正比, 即:

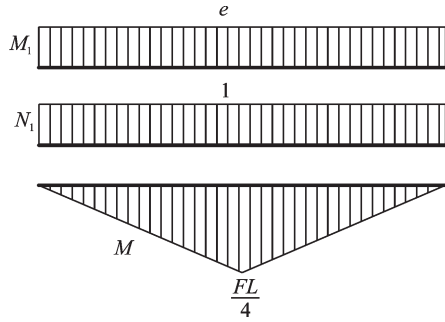


图5 跨中作用集中力的弯矩和轴力图

Fig. 5 Bending moment and axial force diagram of concentrated force acting at mid-span

$$\Delta P = \frac{\delta_{1p}}{\delta_{11}} = \frac{FL e}{8(e^2 + i_1^2)} \quad (26)$$

$$\text{式中 } i_1 = \sqrt{\frac{I_D}{A_s}}$$

在ICBGCSW的跨中作用 F 时,跨中的位移如下式所示:

$$y_F = \frac{FL^3}{48EI} \quad (27)$$

由式(26)得到 F 关于 ΔP 的函数,代入式(27)中得:

$$y_F = \frac{\Delta PL^2(e^2 + i_1^2)}{6EIe} \quad (28)$$

根据位移互等定理可知, ΔP 在中点处产生的位移如下式所示:

$$y_{\Delta P} = \frac{L^2 e}{8EI} \Delta P \quad (29)$$

$$y_{F-\Delta P} = y_F - y_{\Delta P} = \frac{L^2(e^2 + 4i_1^2)}{24EIe} \Delta P \quad (30)$$

将式(26)代入式(22)中可得:

$$EI_D \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - \left[P_0 - \frac{24EIe^2}{L^2(e^2 + 4i_1^2)} \right] \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (31)$$

假设ICBGCSW的振动位移如下式所示:

$$y(x, t) = W(x) e^{i\omega t} \quad (32)$$

式中 $W(x)$ 为位移的幅值; ω 为圆频率。

将式(32)代入式(31)中可得:

$$EI_D \frac{d^4 W}{dx^4} - \left[P_0 - \frac{24EI_D e^2}{(e^2 + 4i_1^2)L^2} \right] \frac{d^2 W}{dx^2} - m\omega^2 W = 0 \quad (33)$$

ICBGCSW的振型函数如下式所示:

$$W(x) = A \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (34)$$

式中 A 为振幅; n 为ICBGCSW的自振频率阶数。

将式(34)代入式(33)中,可得ICBGCSW的振动圆频率如下式所示:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{EI_D}{m} \frac{n^2 \pi^2}{L^2}} \zeta \quad (35)$$

$$\text{式中 } \zeta = \sqrt{1 + \frac{P_0}{EI_D} \left(\frac{L}{n\pi} \right)^2 - \frac{24e^2}{(e^2 + 4i_1^2)} \left(\frac{1}{n\pi} \right)^2}$$

根据文献[34],波形钢腹板的剪切变形对该桥型自振频率影响较大。本文按照文献[34]的方式研究波形钢腹板的剪切变形对自振频率的影响,考虑温度效应和波形钢腹板的剪切变形下ICBGCSW的自振圆频率计算公式如下式所示:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{EI_D}{m} \frac{n^2 \pi^2}{L^2}} \zeta \eta \quad (36)$$

$$\text{式中 } G \text{ 为钢材的剪切模量; } \eta = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{EI_D}{GA_\omega} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2}}$$

其中 A_ω 为波形钢腹板的横截面面积。

考虑温度效应和波形钢腹板的剪切变形下ICBGCSW的自振频率计算公式如下式所示:

$$f_n = \sqrt{\frac{EI_D}{m} \frac{n^2 \pi}{2L^2}} \zeta \eta \quad (37)$$

3 解析解验证

3.1 工程背景

为了验证本文所提方法的正确性和适用性,以甘肃省兰州市中川机场连接线主匝道高架桥为工程背景,选取计算跨径为30 m的简支ICBGCSW进行动力特性分析。该桥是国内的首座ICBGCSW,也是交通运输部首批公路钢结构桥梁的示范项目,简支ICBGCSW的构造如图6所示。



图6 改进型波形钢腹板组合简支箱梁

Fig. 6 Improved composite simple supported box girder with corrugated steel webs

ICBGCSW截面形式采用四箱单室,单箱截面的具体尺寸如图7所示。混凝土标号为C50,弹性模量为 3.45×10^4 MPa,泊松比为0.2,密度为2500 kg/m³。钢材的弹性模量为 2.1×10^5 MPa,泊松比为0.3,密度为7850 kg/m³。波形钢腹板的波型为1200

型,厚度为10 mm,波高为200 mm,如图8所示。箱内每隔4.8 m设置一道钢横隔板,并布置双面竖向加劲肋来增强刚度。在横隔板对应位置的波形钢腹板上设置K型钢横联。

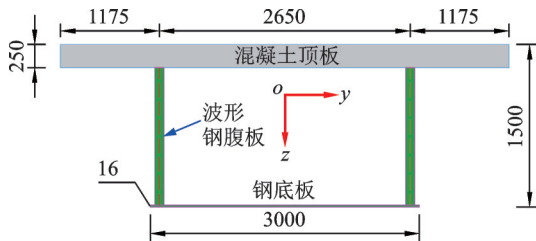


图7 单箱截面尺寸图(单位: mm)

Fig.7 Dimensions diagram of a single box section (Unit: mm)

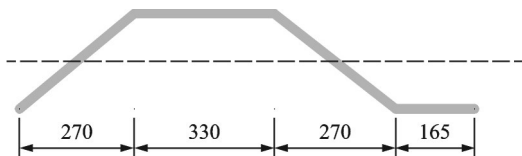


图8 波形钢腹板外形尺寸图(单位: mm)

Fig.8 Outline dimension diagram of corrugated steel webs (Unit: mm)

3.2 有限元模型的建立

采用ANSYS 18.0三维有限元软件建立了ICB-GCSW的空间有限元模型。采用实体单元SOLID45模拟混凝土顶板;波形钢腹板、钢底板、加劲肋、横隔板和钢横联全部采用壳单元SHELL63进行模拟。实体单元和壳单元之间通过刚性连接的方式进行连接,壳单元与壳单元之间通过共节点的方式进行连接。简支ICBGCSW的边界条件为一端约束横向、纵向和竖向3个方向的位移,另一端约束横向和竖向2个方向的位移。通过固定铰支座来约束简支梁的横向、竖向和纵向3个方向的位移;通过活动铰支座来约束简支梁的竖向和横向位移,使其只能产生纵向位移。简支ICBGCSW的ANSYS有限元模型如图9所示。

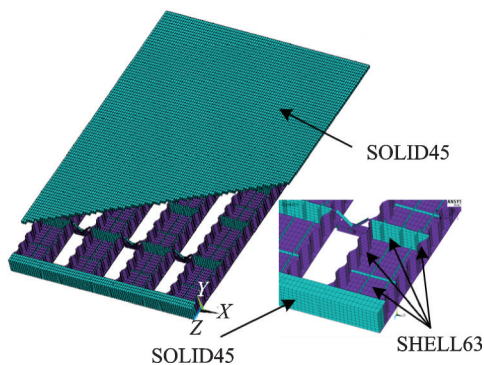


图9 简支梁的有限元模型

Fig.9 Finite element model of the simple supported girder

3.3 模态测试

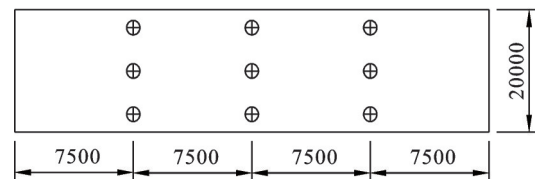
用东方所的INV3060S型24位动态信号测试系统对简支ICBGCSW进行模态测试,采用激振方式为环境激励,当时的环境温度为-5℃。在简支梁桥面板上的四分之一跨、跨中和四分之三跨布置拾振器,共布置了9个测点,试验的测点布置、数据采集和拾振器布置如图10所示。



(a) 测点布置
(a) Measuring points layout



(b) 数据采集
(b) Data collection



(c) 拾振器布置图(单位: mm)
(c) Layout of vibration pickup (Unit: mm)

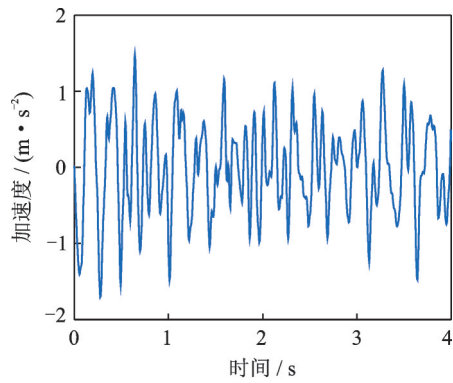
图10 模态测试

Fig.10 Modal testing

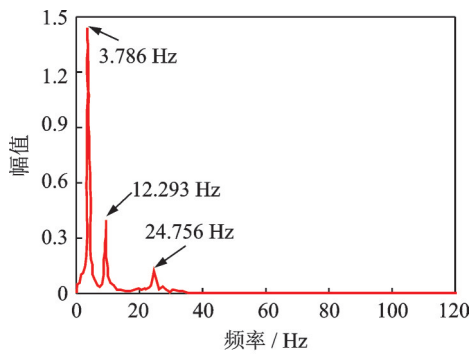
实桥的实测加速度响应如图11(a)所示,利用东方所的INV3060S型24位动态信号测试系统对实测加速度信号进行频谱分析,得到了简支ICBGCSW的自振频率、振型和阻尼比,简支梁的前3阶频率实测结果如图11(b)所示。

为了验证2.2节建立的ICBGCSW有限元模型的正确性,将简支ICBGCSW自振频率的实测结果与ANSYS有限元分析结果进行对比,其结果如表1所示。从表1中可以看出,简支梁自振频率的有限元结果与实测结果吻合较好,由此说明了2.2节所建立的有限元模型的正确性。

为了进一步验证2.2节所建立的有限元模型的



(a) 振动加速度响应
(a) Vibration acceleration response



(b) 频谱图
(b) Frequency spectrum diagram

图 11 简支梁的振动加速度响应和频谱图

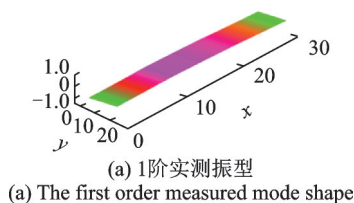
Fig. 11 Vibration acceleration response and frequency spectrum diagram of simple supported girder

表 1 简支梁自振频率的有限元值与实测值对比

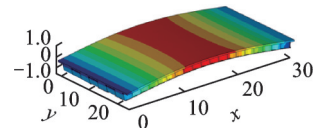
Tab. 1 Comparison between the finite element value and the measured value of the natural frequencies of the simple supported girder

频率阶数	实测值		有限元值	$\frac{ \text{③} - \text{①} }{\text{①}}/\%$
	①频率/Hz	②阻尼比/%	③频率/Hz	
1阶	3.786	2.47	3.517	7.11
2阶	12.293	1.35	12.685	3.19
3阶	24.756	2.26	24.529	0.92

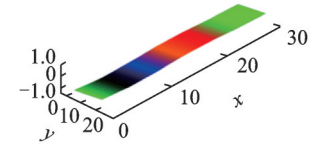
正确性,将有限元分析的振型与动力测试的实测振型进行对比,如图 12 所示。从图 12 中可以看出,通过有限元分析获取的简支梁振型与实测振型吻合良好,进一步验证了所建立的有限元模型的正确性。



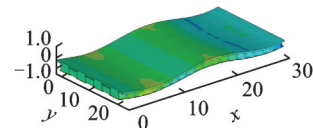
(a) 1阶实测振型
(a) The first order measured mode shape



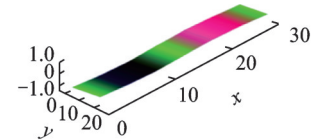
(b) 1阶有限元振型
(b) The first order finite element mode shape



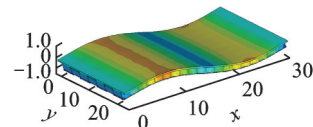
(c) 2阶实测振型
(c) The second order measured mode shape



(d) 2阶有限元振型
(d) The second order finite element mode shape



(e) 3阶实测振型
(e) The third order measured mode shape



(f) 3阶有限元振型
(f) The third order finite element mode shape

图 12 前 3 阶竖向弯曲振型对比

Fig. 12 Comparison of the first three-order vertical bending mode shapes

3.4 对比验证

将本文所推导的自振频率公式的计算结果与 ANSYS 有限元分析结果和试验实测结果进行对比,如表 2 所示。从表 2 中可以看出,本文公式的计算结果与有限元结果和实测结果吻合较好,验证了本文公式的正确性和适用性。

表 2 不同方法计算的自振频率对比(单位: Hz)

Tab. 2 Comparison of natural frequencies calculated by different methods (Unit: Hz)

频率阶数	①计算值	②有限元值	③实测值	$\frac{ \text{②} - \text{①} }{\text{①}}/\%$	$\frac{ \text{③} - \text{①} }{\text{①}}/\%$
1阶	3.419	3.517	3.786	2.87	10.73
2阶	12.613	12.685	12.293	0.57	2.53
3阶	24.368	24.529	24.756	0.66	1.59
4阶	36.918	36.874	—	0.12	—
5阶	49.577	49.042	—	1.08	—

4 参数分析

为了研究温度等效轴向偏心力变化、弹性模量变化、剪切变形效应、不同高跨比和不同宽跨比下温度效应对自振频率的影响,通过控制变量法,采用式(37)分析了各参数对ICBGCSW自振频率的影响。

4.1 温度等效轴向偏心力变化对自振频率的影响

为了研究温度等效轴向偏心力变化对ICBGCSW自振频率的影响,仅考虑温度等效轴向偏心力的变化,其他条件保持不变,将不同温度下是否考虑温度等效轴向偏心力变化计算的自振频率的误差进行比较,如图13所示。

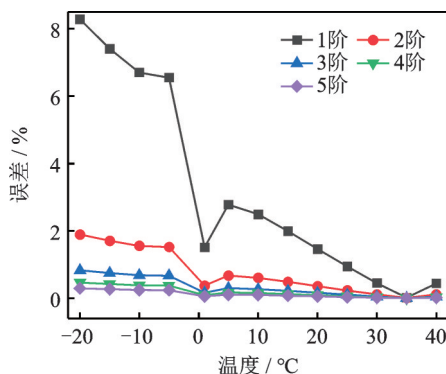


图13 温度等效轴向偏心力变化对自振频率的影响
Fig. 13 Effect of temperature equivalent axial eccentric force on natural frequencies

从图13中可以看出,温度等效轴向偏心力对ICBGCSW自振频率的影响随着频率阶数的升高而减小,对ICBGCSW的基频影响较大,在-20°C时是否考虑温度等效轴向偏心力所求得基频的误差已超过8%,随着温度的升高,温度等效轴向偏心力对自振频率的影响逐渐减小。结果表明:分析ICBGCSW的基频时需要考虑环境温度的影响。

4.2 弹性模量变化对自振频率的影响

在温度效应作用下材料弹性模量会发生变化,根据式(17)和(18)计算得到变化后的混凝土和钢材的弹性模量,如图14所示。从图14中可以看出,混凝土和钢材的弹性模量随着温度的升高而逐渐减小。

为了研究温度导致材料弹性模量变化对ICBGCSW自振频率的影响,仅考虑弹性模量的变化,其他条件保持不变,将不同温度下是否考虑弹性模量变化计算的自振频率的误差进行比较,如图15所示。

从图15中可以看出,温度导致材料弹性模量

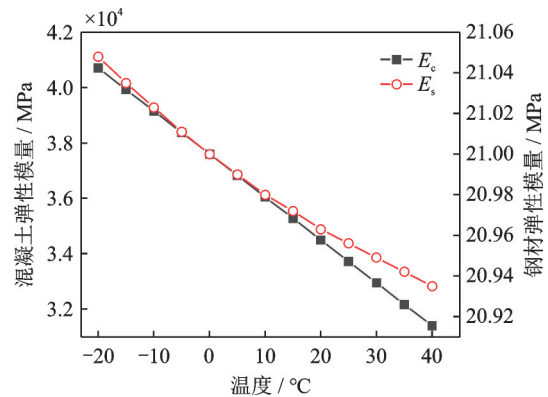


图14 不同温度下材料的弹性模量

Fig. 14 Elastic modulus of materials at different temperatures

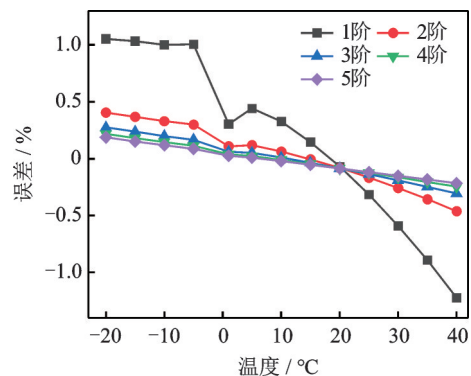


图15 弹性模量变化对自振频率的影响

Fig. 15 Influence of change of elastic modulus on natural frequencies

变化对ICBGCSW自振频率的影响较小,随着频率阶数的升高而减小,且随着温度的升高而逐渐减小,弹性模量变化对自振频率的影响从第2阶自振频率开始已小于0.5%。结果表明:弹性模量的变化对ICBGCSW自振频率的影响可以忽略不计。

4.3 剪切变化效应对自振频率的影响

为了研究波形钢腹板的剪切变形对ICBGCSW自振频率的影响,其他条件保持不变,将考虑剪切变形与不考虑剪切变形计算的ICBGCSW自振频率进行比较,如表3所示。

从表3中可以看出,波形钢腹板的剪切变形对自振频率的影响较大,随着频率阶数的升高而增大,

表3 波形钢腹板的剪切变形对自振频率的影响(单位:Hz)
Tab. 3 Influence of shear deformation of corrugated steel webs on natural frequencies (Unit: Hz)

频率阶数	①考虑剪切变形	②不考虑剪切变形	$\frac{ \text{②} - \text{①} }{\text{①}}/\%$
1阶	3.419	3.600	5.31
2阶	12.613	15.113	19.82
3阶	24.368	34.294	40.73
4阶	36.918	61.145	65.63
5阶	49.577	95.669	92.97

波形钢腹板的剪切变形对自振频率的影响从第4阶频率开始已超过50%。结果表明:分析ICBGCSW的自振频率时需要考虑波形钢腹板剪切变形效应的影响。

4.4 不同高跨比下温度效应对自振频率的影响

为了研究高跨比对ICBGCSW自振频率的影响,本节仅通过改变梁高来改变高跨比,将ICBGCSW的梁高依次取为1.2, 1.5, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7和3.0 m,相应的高跨比依次为0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09和0.10,得到考虑温度自应力、弹性模量变化和剪切变形效应下简支梁的自振频率,如图16所示。从图16中可以看出,随着高跨比的增大,自振频率依次增大,且自振频率的阶数越高影响越大。

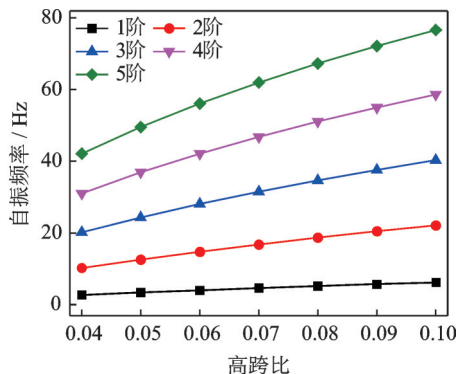


图16 高跨比对自振频率的影响

Fig. 16 Influence of height-span ratios on natural frequencies

为了进一步研究不同高跨比下温度效应对ICBGCSW自振频率的影响,将不同高跨比下是否考虑温度效应计算的自振频率的误差进行比较,如图17所示。从图17中可以看出,不同高跨比下,温度效应对基频的影响较大,且随着高跨比的增大呈线性急剧增大。高跨比从0.04增加到0.10,温度效应对基频的影响已从5.45%增加到了12.69%,从第2阶自振频率开始,温度效应的影响急剧减小,均在3%以下。结果表明:对于梁高较大的ICBGCSW,进行基频分析时需要考虑温度效应的影响。

4.5 不同宽跨比下温度效应对自振频率的影响

为了研究宽跨比对ICBGCSW自振频率的影响,本节仅改变箱梁的内翼板,其他条件保持不变。将内翼缘宽度依次取为1.5, 1.95, 2.4, 2.85, 3.0和3.75 m,相应的宽跨比为0.050, 0.065, 0.08, 0.095, 0.100和0.125,得到考虑温度自应力、弹性模量变化和剪切变形效应下简支梁的自振频率,如图18所

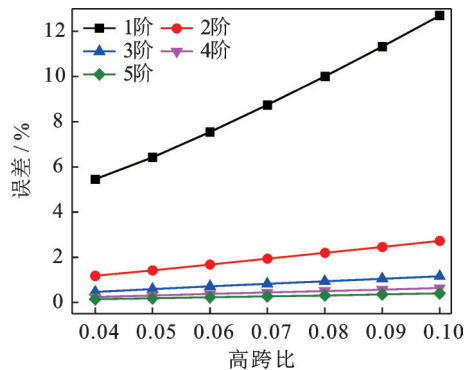


图17 不同高跨比下温度效应对自振频率的影响

Fig. 17 Influence of temperature effect on natural frequencies under different height-span ratios

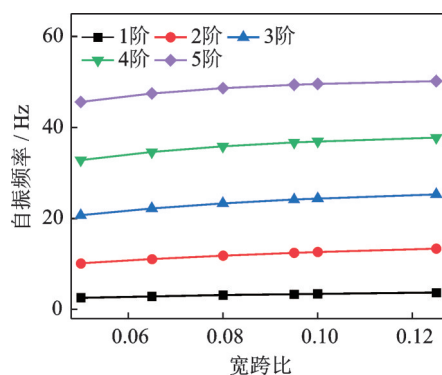


图18 宽跨比对自振频率的影响

Fig. 18 Influence of width-span ratios on natural frequencies

示。从图18中可以看出,随着宽跨比的增大,自振频率依次增大,但增长趋势较为平缓。

为了进一步研究不同宽跨比下温度效应对ICBGCSW自振频率的影响,将不同宽跨比下是否考虑温度效应计算的自振频率的误差进行比较,如图19所示。从图19中可以看出,温度效应对自振频率的影响受宽跨比的影响较小,宽跨比从0.050增加到0.125,温度效应对自振频率影响的变化在1%以内。结果表明:不同宽跨比下温度效应对自振频率的影响较小,可以忽略不计。

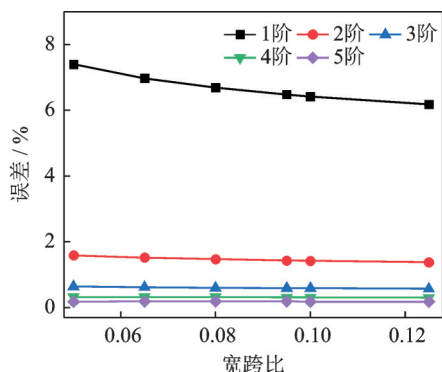


图19 不同宽跨比下温度效应对自振频率的影响

Fig. 19 Influence of temperature effect on natural frequencies under different width-span ratios

5 结 论

本文综合考虑温度等效轴向偏心力变化、弹性模量变化、波形钢腹板的剪切变形效应推导了ICB-GCSW自振频率的解析公式,通过实桥试验的实测结果和ANSYS有限元结果对公式的正确性进行了验证。

(1) 温度等效轴向偏心力对自振频率的影响随着温度的升高而减小,同时也随着自振频率阶数的升高而减小;温度等效轴向偏心力对基频的影响较大, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时是否考虑温度等效轴向偏心力计算的基频的误差已超过8%。结果表明:分析ICBGCSW的基频时需要考虑环境温度的影响。

(2) 波形钢腹板的剪切变形对自振频率的影响较大,随着自振频率阶数的升高而增大,波形钢腹板的剪切变形对自振频率的影响从第4阶频率开始已超过50%。

(3) 不同高跨比下,温度效应对基频的影响较大,且随着高跨比的增大呈线性急剧增大。高跨比从0.04增加到0.10,温度效应对基频的影响从5.45%增加到12.69%,从第2阶自振频率开始,受温度效应的影响急剧减小,在3%以下。结果表明:对于梁高较大的ICBGCSW,在进行基频分析时需要考虑温度效应的影响。

(4) 温度效应对自振频率的影响受宽跨比的影响较小,宽跨比从0.050增加到0.125,温度效应对自振频率影响的变化在1%以内。结果表明:不同宽跨比下温度效应对自振频率的影响较小,可以忽略不计。

参考文献:

- [1] Jiang R J, Au F T K, Xiao Y F. Prestressed concrete girder bridges with corrugated steel webs: review [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141 (2): 04014108.
- [2] Nguyen N D, Han S R, Kim J H, et al. Moment modification factors of I-girder with trapezoidal web corrugations under moment gradient [J]. *Thin-Walled Structures*, 2012, 57: 1-12.
- [3] Chen Y Y, Dong J C, Tong Z J, et al. Flexural behavior of composite box girders with corrugated steel webs and trusses [J]. *Engineering Structures*, 2020, 209: 110275.
- [4] Kovesdi B, Jager B, Dunai L. Bending and shear interaction behavior of girders with trapezoidally corrugated webs [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 121: 383-397.
- [5] Papangelis J, Trahair N, Hancock G. Direct strength method for shear capacity of beams with corrugated webs [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 137: 152-160.
- [6] Aggarwal K, Wu S, Papangelis J, et al. Finite element analysis of local shear buckling in corrugated web beams [J]. *Engineering Structures*, 2018, 162: 37-50.
- [7] Zhou M, Li S. Shear performance of tapered beams with concrete flanges and corrugated steel webs: theory, experiments, and numerical simulations [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2021, 147(7): 04021085.
- [8] Zhu Y B, Wan S, Shen K J, et al. Theoretical study on the nonlinear performance of single-box multi-cell composite box-girder with corrugated steel webs under pure torsion [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 178: 106487.
- [9] Zhou C, Li L F, Wang L H. Improved softened membrane model for prestressed composite box girders with corrugated steel webs under pure torsion [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 153: 372-384.
- [10] 张永健,黄平明,狄谨,等.波形钢腹板组合箱梁自振特性与试验研究 [J]. *交通运输工程学报*, 2008, 8(5): 76-80.
Zhang Yongjian, Huang Pingming, Di Jin, et al. Free vibration characteristics and experiment study of composite box girder with corrugated steel webs [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2008, 8(5): 76-80.
- [11] Cao L, Liu J P, Frank Chen Y. Theoretical and numerical study on the natural frequencies of bridges with corrugated steel webs [J]. *Structures*, 2018, 15: 224-231.
- [12] Ji W, Deng L, Liu S Z, et al. Study of vertical bending vibration behavior of continuous prestressed concrete box girders with corrugated steel webs [J]. *Advances in Structural Engineering*, 2016, 19(6): 953-965.
- [13] Yang Z Y, Yang M, Rong X L, et al. Theoretical and numerical study on dynamic characteristics of composite trough girder with corrugated steel webs [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2021, 26(3): 04021008.
- [14] Jiang L Z, Chai X L, Feng Y L, et al. Dynamic characteristic study of composite box beam with corrugated webs considering interface slip and shear deformation [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 189(2): 022015.
- [15] Zhu L, Wang H L, Han B, et al. Dynamic analysis of a coupled steel-concrete composite box girder bridge-train system considering slip and shear-lag [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157: 107060.
- [16] Feng Y L, Jiang L Z, Zhou W B. Improved analytical method to investigate the dynamic characteristics of

- composite box beam with corrugated webs[J]. International Journal of Steel Structures, 2020, 20(1): 194-206.
- [17] 郑尚敏, 马磊, 万水. 体外预应力对波形钢腹板箱梁自振频率的影响分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(1): 140-144.
Zheng Shangmin, Ma Lei, Wan Shui. Analysis on effects of externally prestressed tendons on vibration frequency of box girder with corrugated steel webs[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(1): 140-144.
- [18] 李志聪, 张鹏. 波形钢腹板组合连续箱梁动力特性研究[J]. 公路, 2019, 64(8): 127-130.
- [19] 石锦光. 波形钢腹板PC组合箱梁的动力特性分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
Shi Jinguang. Dynamic characteristics analysis of PC composite box-girder with corrugated steel webs[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [20] 张均洁. 波纹钢腹板混凝土箱梁动力特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
Zhang Junjie. Research on dynamic characteristic of concrete box-girder with corrugated steel webs[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [21] Nie J G, Zhu Y J, Tao M X, et al. Optimized prestressed continuous composite girder bridges with corrugated steel webs[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(2): 04016121.
- [22] Ma C, Liu S Z, Di J, et al. Analysis of pure bending vertical deflection of improved composite box girders with corrugated steel webs[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 6617846.
- [23] 冀伟, 罗奎, 马万良, 等. 波形钢腹板-钢底板-混凝土顶板组合简支箱梁纯弯曲竖向振动频率的参数分析[J]. 振动工程学报, 2020, 33(5): 1053-1061.
Ji Wei, Luo Kui, Ma Wanliang, et al. Parametric analysis of pure bending vertical vibration frequency of composite simple support box girder with corrugated steel webs-steel bottom-concrete top[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(5): 1053-1061.
- [24] 冀伟, 罗奎, 闫林君. 波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥的自振特性分析[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(1): 190-196.
Ji Wei, Luo Kui, Yan Linjun. Analysis of natural vibration characteristics of corrugated web steel box-concrete composite girder bridge[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(1): 190-196.
- [25] 冀伟, 罗奎, 马万良, 等. 装配式波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥动力特性分析与试验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(20): 1-7.
Ji Wei, Luo Kui, Ma Wanliang, et al. Dynamic characteristics analysis and experimental study of a fabricated corrugated web steel box-concrete composite girder bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(20): 1-7.
- [26] Kong X, Luo K, Ji W, et al. Study on dynamic characteristics of an improved composite box girder with corrugated steel webs[J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(6): 04022035.
- [27] 罗奎. 波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥的动力特性研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
Luo Kui. Study on dynamic characteristics of corrugated web steel box-concrete composite girder bridge[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [28] 罗奎, 冀伟, 张经纬. 基于动力刚度矩阵的波形钢腹板PC连续箱梁桥自振频率分析[J]. 公路交通科技, 2020, 37(2): 91-98.
Luo Kui, Ji Wei, Zhang Jingwei. Analysis on natural vibration frequencies of PC continuous box girder bridge with corrugated steel webs based on dynamic stiffness matrix[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(2): 91-98.
- [29] 时玉平. 桥梁自振频率温度效应分析及寒冷地区吊杆索力监测系统构建[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Shi Yuping. Temperature effect analysis on bridge natural frequency and monitoring system construction of forces in hangers in chill region[D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [30] 王力, 刘世忠, 丁万鹏, 等. 考虑时变温度作用的新型波形钢腹板组合箱梁动力特性分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(4): 58-65.
Wang Li, Liu Shizhong, Ding Wanpeng, et al. Dynamic analysis of a new-pattern composite box girder with corrugated steel webs under time-varying temperature condition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(4): 58-65.
- [31] 王晶莹. 基于多元温度场的简支梁桥自振频率研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
Wang Jingying. Research on natural frequency of simply supported beam basis on multiple temperature fields[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [32] Xia Y, Xu Y L, Wei Z L, et al. Variation of structural vibration characteristics versus non-uniform temperature distribution[J]. Engineering Structures, 2011, 33(1): 146-153.
- [33] 李国强, 陈凯, 蒋首超, 等. 高温下Q345钢的材料性能试验研究[J]. 建筑结构, 2001, 31(1): 53-55.
Li Guoqiang, Chen Kai, Jiang Shouchao, et al. Experimental research on material properties of Q345 steel at high temperature[J]. Building Structure, 2001, 31(1): 53-55.
- [34] 林梦凯, 冀伟, 李海莲, 等. 波形钢腹板工字型钢梁的

手风琴效应研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13
(2): 283-288.
Lin Mengkai, Ji Wei, Li Hailian, Study on accordion

effect of corrugated steel webs I-shaped steel girder[J].
Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13
(2): 283-288.

Dynamic characteristics of an improved composite box girder with corrugated steel webs considering temperature and shear deformation

CHEN Xue-song¹, LUO Kui², JI Wei³, ZHANG Jing-wei⁴, WU Zhi-bo², LIU Ming¹

(1. College of Railway Engineering, Liaoning Railway Vocational and Technical College, Jinzhou 121000, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

4. Gansu Henglu Traffic Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to accurately analyze the influence of temperature and shear deformation effects on the natural vibration characteristics of the improved composite box girder with corrugated steel webs, a method for analyzing the natural vibration characteristics of an improved composite box girder with corrugated steel webs considering temperature and shear deformation effects is proposed in this paper. Considering the influence of the temperature, shear deformation and stiffness correction of the corrugated steel web, the analytical formula of the natural frequency of the improved composite box girder with corrugated steel webs is deduced by using the principle of stress equivalence; The correctness of the analytical formula of natural frequency is verified by using the ANSYS finite element results and the measured results of bridge; The effects of temperature equivalent axial eccentric force, variation of elastic modulus, shear deformation, and temperature effect under different height-span ratios and different width-span ratios on the natural frequencies of bridge are analyzed. The results show that the fundamental frequency of the improved composite box girder with corrugated steel webs is greatly affected by the temperature effect, and the influence of the temperature effect needs to be considered when calculating the fundamental frequency of this bridge type; The shear deformation effect of the corrugated steel web has a significant influence on the natural frequencies of the bridge type, and the influence of shear deformation from the 4th order natural frequencies has exceeded 50%; Under different height-span ratios, the temperature effect has a greater influence on the fundamental frequencies, and it increases linearly and sharply with the increase of the height-span ratios; Under different width-span ratios, the temperature effect has little influence on the natural frequencies and can be ignored. The research results can provide a reference for the calculation and analysis of the natural frequencies of the improved composite box girder with corrugated steel webs.

Key words: composite box girder; corrugated steel webs; temperature effect; shear deformation; modal test; natural frequency

作者简介: 陈雪松(1997—),男,硕士,助教。E-mail: c.xuesong@qq.com。

通讯作者: 罗奎(1991—),男,博士研究生。E-mail: luokui@hnu.edu.cn。