

波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥的自振特性分析*

冀 伟, 罗 奎, 闫林君

(兰州交通大学土木工程学院 兰州, 730070)

摘要 为了获得波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥振动频率的简化计算方法,首先,在综合考虑箱梁的剪力滞效应和波形钢腹板剪切变形效应的基础上,运用势能驻值原理推导出波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥的单元刚度矩阵;其次,根据所推导的单元刚度矩阵和单元质量矩阵,采用 Matlab 软件编写波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥振动频率计算的求解程序;最后,对振动频率求解程序的收敛速度和计算效率进行了分析。研究表明:振动频率求解程序所得的频率值与 ANSYS 空间有限元值和实测值吻合良好;采用振动频率求解程序计算频率时只需较少的单元数量,即可达到较高的计算精度;大大缩短了振动频率求解的计算时间,提高了计算效率,避免了 ANSYS 空间有限元模型建立和求解的复杂性,为工程中该类桥型自振特性分析提供了一种简便方法。

关键词 波形钢腹板; 振动频率; 单元刚度矩阵; 组合梁桥; 有限元分析

中图分类号 U441+.3; TH113.1

1 问题的引出

波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥是由混凝土顶板、波形钢腹板以及钢底板组成的新型组合结构,是对传统的波形钢腹板组合梁进行的改进。图 1 为波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥截面图。该桥型具有以下 4 个优点:①外形美观、造型新颖、梁体制作方便、便于汽车运输和安装;②桥梁结构自重轻,跨越能力大,有效解决了传统混凝土腹板和底板易开裂的问题^[1];③降低截面的附加应力,提高了预应力入度,使桥面板拉应力满足预应力 A 类构件的要求,达到材料的优质组合;④利用压型钢板和预制板实现无模板施工,具有良好的发展前景。

目前,众多学者已对波形钢腹板组合梁桥的屈

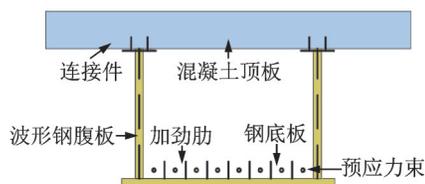


图 1 波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥截面图

Fig.1 Section diagram of steel box-concrete composite-girder with corrugated steel web

曲性能、扭转性能、疲劳性能、抗弯性能以及长期效应等开展了大量的研究工作。John 等^[2]推导了梯形波形钢腹板梁抗剪承载的计算公式,给出了波形钢腹板局部剪切屈曲系数。Shen 等^[3]采用试验并结合有限元仿真模拟对单箱多室波形钢腹板组合箱梁桥的扭转性能进行了研究。Yuan 等^[4]通过试验手段对波形钢腹板组合梁疲劳性能进行了研究,试验结果表明,最终的破坏模式为混凝土底板的剪切破坏以及波形钢腹板和混凝土底板连接处的层间滑移破坏。Köesdi 等^[5]研究了弯曲变形和剪切变形的相互作用对波形钢腹板组合梁的力学性能的影响。Chen 等^[6]研究了预应力对波形钢腹板组合梁桥力学性能的影响。罗奎等^[7-9]考虑剪力滞和剪切变形效应的影响,对简支和连续波形钢腹板组合箱梁自振频率和挠度进行了研究。刘保东等^[10]对波形钢腹板连续箱梁的弯剪受力性能和破坏机理进行了试验研究。李立峰等^[11]推导了变截面波形钢腹板组合箱梁在偏心荷载作用下的畸变正应力的理论计算公式。周聪等^[12]采用理论分析结合试验,对波形钢腹板组合箱梁桥的扭转性能进行了全过程分析。桂水荣等^[13]研究了箱梁截面形式、横隔板的布置方式以及支座的横向约束方式对大跨波形钢腹板组合梁

* 国家自然科学基金资助项目(51708269, 51868039);甘肃省住房和城乡建设厅科研资助项目(JK2018-46, JK2020-21);甘肃省科技重点研发计划资助项目(20YF3FA039);兰州交通大学“百名青年优秀人才培养计划”基金资助项目

收稿日期:2019-04-29;修回日期:2019-08-20

桥自振特性的影响。郑尚敏等^[14]对单箱多室波形钢腹板组合箱梁的扭转性能进行了研究。冀伟等^[15]在综合考虑波形钢腹板的剪切变形和箱梁的剪力滞的基础上,运用能量变分原理和 Hamilton 原理,推导出波形钢腹板筒支箱梁桥的自振频率计算公式,结合三弯矩方程推导出波形钢腹板连续箱梁桥的自振频率计算公式^[16-17]。文献[15-17]的解析式只适用于特定的荷载和边界条件,需要建立 ANSYS 空间有限元实体模型进行比较。因此,寻求一种波形钢腹板组合箱梁自振频率计算的简化分析方法具有重要的研究意义。

笔者在文献[15-17]的基础上,运用势能驻值原理,推导出波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥的单元刚度矩阵和单元质量矩阵。采用 Matlab 有限元软件编写了计算波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥自振频率和振型的求解程序,为实际工程中波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥自振特性的计算提供了一种简化的计算方法。

2 单元刚度矩阵和单元质量矩阵建立

2.1 基本假定

建立单元刚度矩阵和单元质量矩阵的基本假定如下:

1) 只考虑波形钢腹板的剪切应变能,将其弯曲应变能忽略不计;

2) 忽略混凝土顶板和钢底板平面外的切应变 γ_{xz} 和 γ_{yz} 以及正应变 ϵ_y , 仅考虑混凝土顶板和钢底板平面内的切应变 γ_{xy} 和 ϵ_x ;

3) 不考虑波形腹板钢箱-混凝土组合梁的混凝土顶板和波形钢腹板交界处的滑移效应;

4) 将钢筋的影响忽略不计。

波形腹板钢箱-混凝土组合梁的横截面构造形式如图 2 所示。分析其自由振动时,根据文献[18],该桥型的位移模式可用梁的竖向挠曲位移 w 和桥梁的纵向位移 u 进行描述,如式(1)和式(2)所示。

$$w = w(x, t) \tag{1}$$

$$u(x, y, z, t) = h_i [\alpha(x, t) + g(y)\varphi(x, t)] \tag{2}$$

其中: b 和 ξb 分别为波形腹板钢箱-混凝土组合梁混凝土顶板箱中部分长度的一半和悬臂板的长度; h_i 为箱梁整体截面的形心到顶底板形心的距离; $\alpha(x, t)$ 和 $\varphi(x, t)$ 为波形腹板钢箱-混凝土组合梁在

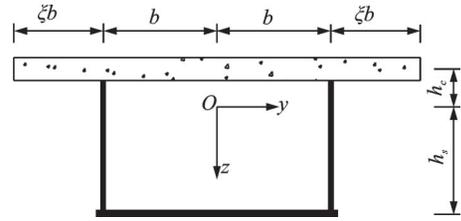


图 2 横截面构造形式

Fig.2 Structural form of the cross section of the box girder

发生自由振动时,弯曲变形引起的转角函数和剪切转角的最大差值函数。

根据文献[18], $g(y)$ 的计算式为

$$g(y) = \begin{cases} 1 - (y/b)^3 & (0 \leq y \leq b) \\ 1 - [(b + \xi b - y)/\xi b]^3 & (b \leq y \leq b + \xi b) \end{cases} \tag{3}$$

2.2 总势能的建立

根据基本假设,得到波形腹板钢箱-混凝土组合梁各部分的应变能如式(4)~(7)所示。

$$\epsilon_{xc} = \frac{\partial u}{\partial x} = h_c \{ \alpha'(x, t) + [1 - (y/b)^3] \varphi'(x, t) \} \tag{4}$$

$$\gamma_c = \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{3}{b} h_c (y/b)^2 \varphi(x, t) \tag{5}$$

$$\epsilon_{xs} = \frac{\partial u}{\partial x} = h_s \{ \alpha'(x, t) + [1 - [(b + \xi b - y)/\xi b]^3] \varphi'(x, t) \} \tag{6}$$

$$\gamma_s = \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{3}{\xi b} h_s [(b + \xi b - y)/\xi b]^2 \varphi(x, t) \tag{7}$$

其中: $\alpha'(x, t)$ 和 $\varphi'(x, t)$ 分别为 $\alpha(x, t)$ 和 $\varphi(x, t)$ 关于 x 的一阶导数。

波形钢腹板产生的剪切变形为

$$\gamma_w(x, t) = w'(x, t) - \alpha(x, t) \tag{8}$$

其中: $w(x, t)$ 为波形腹板钢箱-混凝土组合梁发生自由振动时,横截面的角位移函数; $\gamma_w(x, t)$ 为波形钢腹板的剪切变形。

波形腹板钢箱-混凝土组合梁的混凝土顶板、波形钢腹板以及钢底板的应变能分别为

$$\bar{V}_s = \frac{1}{2} \int_0^l \iint_A (E_c \epsilon_{xc}^2 + G_c \gamma_c^2) dydzdx \tag{9}$$

$$\bar{V}_F = \frac{1}{2} \int_0^l \iint_A G_w \gamma_w^2 dydzdx \tag{10}$$

$$\bar{V}_x = \frac{1}{2} \int_0^l \iint_A (E_s \epsilon_{xs}^2 + G_s \gamma_s^2) dydzdx \tag{11}$$

波形腹板钢箱-混凝土组合梁的外力势能为

$$\bar{W}_B = - \int_0^l q(x,t)w(x,t) dx \quad (12)$$

其中: $\bar{V}_S, \bar{V}_F, \bar{V}_X$ 分别为波形腹板钢箱-混凝土组合梁的混凝土顶板、钢腹板和钢底板的应变能; \bar{W}_B 为波形腹板钢箱-混凝土组合梁的外力势能; $q(x,t)$ 为作用在梁上的竖向荷载集度; E_c, G_c 分别为混凝土的弹性模量和剪切模量; E_s, G_s 分别为钢材弹性模

$$\begin{aligned} \Pi = \frac{1}{2} \int_0^l \{ \kappa_0 ([\alpha'(x,t)]^2 + \frac{3}{2} \alpha'(x,t)\varphi'(x,t) + \frac{9}{14} [\varphi'(x,t)]^2) + \\ \chi_0 \frac{9}{5b^2} [\varphi(x,t)]^2 + \chi_1 (w'(x,t) - \alpha(x,t))^2 - \\ 2\bar{q}(x,t)w(x,t) \} dx \end{aligned} \quad (15)$$

其中: $\kappa_0 = E_c I_c + E_s I_s$; $\chi_0 = G_c I_c + G_s I_s$; $\chi_1 = G_w A_w$; I_c, I_s 分别为箱梁的混凝土顶板和钢底板对箱梁整体截面形心轴的惯性矩; A_w 为钢腹板的横截面面积。

2.3 单元刚度矩阵的建立

波形腹板钢箱-混凝土组合梁的梁单元结点位移模式如图3所示。

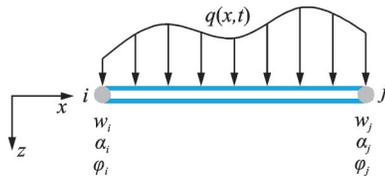


图3 有限元节点位移模式

Fig.3 Node displacement mode of finite element

经计算得到满足工程精度的形函数 $N(x)$, 根据形函数进行插值, 有限元分析的结点位移模式如式(16)~(18)所示。

$$w(x,t) = N_w^T(x)w(t) \quad (16)$$

$$\alpha(x,t) = N_\alpha^T(x)\alpha(t) \quad (17)$$

$$\varphi(x,t) = N_\varphi^T(x)\varphi(t) \quad (18)$$

梁单元的平衡方程为

$$K^e \delta^e = F^e \quad (19)$$

其中:

$$K^e = \begin{bmatrix} K_{11} & \cdots & \text{Sym} \\ K_{21} & K_{22} & \vdots \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}; \delta^e = [w \quad \alpha \quad \varphi]^T; F^e =$$

$[F_1 \quad 0 \quad 0]^T$; K^e, δ^e 和 F^e 分别为波形腹板钢箱-混凝土组合梁的单元刚度矩阵、单元位移矢量以及单元荷载列阵。

形函数取为线性函数, 即

量和剪切模量; G_w 为波形钢腹板的有效剪切模量。

波形腹板钢箱-混凝土组合梁的总应变能 \bar{V}_Z 为

$$\bar{V}_Z = \bar{V}_S + \bar{V}_F + \bar{V}_X \quad (13)$$

波形腹板钢箱-混凝土组合梁的总势能 Π 为

$$\Pi = \bar{V}_Z + \bar{W}_B \quad (14)$$

结合式(12)~(14), 得到波形腹板钢箱-混凝土组合梁的总势能为

$$N_w^T = N_\alpha^T = N_\varphi^T = \left[1 - \frac{x}{l} \quad \frac{x}{l} \right] \quad (20)$$

将梁单元的结点位移代入总势能, 得到波形腹板钢箱-混凝土组合梁的总势能

$$\Pi = \Pi(w, \alpha, \varphi) \quad (21)$$

波形腹板钢箱-混凝土组合梁的总势能 Π 取驻值的充分必要条件为

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi}{\partial w} = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial \alpha} = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = 0 \end{cases} \quad (22)$$

对式(22)的计算结果进行整理, 写成矩阵的形式为

$$\begin{bmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} & \Omega_{13} \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} & \Omega_{23} \\ \Omega_{31} & \Omega_{32} & \Omega_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ \alpha \\ \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

其中: $\Omega_{11} = \chi_1 \int_0^l N_w'(x) [N_w^T(x)]' dx$; $\Omega_{12} = \Omega_{21} =$

$-\chi_1 \int_0^l N_w'(x) N_\alpha^T(x) dx$; $\Omega_{13} = \Omega_{31} = 0$; $\Omega_{22} =$

$\kappa_0 \int_0^l N_\alpha'(x) [N_\alpha^T(x)]' dx + \chi_1 \int_0^l N_\alpha(x) N_\alpha^T(x) dx$;

$\Omega_{23} = \Omega_{32} = \frac{3}{4} \kappa_0 \int_0^l N_\alpha'(x) [N_\varphi^T(x)]' dx$; $\Omega_{33} = \frac{9}{14} \cdot$

$\kappa_0 \int_0^l N_\varphi'(x) [N_\varphi^T(x)]' dx + \frac{9}{5b^2} \chi_0 \int_0^l N_\varphi(x) \cdot$

$N_\varphi^T(x) dx$; $\mathbf{F} = \int_0^l N_w(x,t) q(x,t) dx$ 。

根据式(23), 得到波形腹板钢箱-混凝土组合梁的单元刚度矩阵 K^e 为

$$K^e = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} & \Omega_{13} \\ \Omega_{21} & \Omega_{22} & \Omega_{23} \\ \Omega_{31} & \Omega_{32} & \Omega_{33} \end{bmatrix} \quad (24)$$

将波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥单元刚度矩阵 K^e 分解为 2 部分:弯曲项 K_b^e 和波形钢腹板的剪切变形与箱梁剪力滞效应引起的耦合项 K_s^e 。

$$K^e = K_b^e + K_s^e \quad (25)$$

$$K_b^e = \frac{1}{28l} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} & B_{15} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} & B_{25} & B_{26} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} & B_{35} & B_{36} \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} & B_{45} & B_{46} \\ B_{51} & B_{52} & B_{53} & B_{54} & B_{55} & B_{56} \\ B_{61} & B_{62} & B_{63} & B_{64} & B_{65} & B_{66} \end{bmatrix} \quad (26)$$

其中: $B_{22} = B_{55} = -B_{52} = -B_{25} = 28\kappa_0$; $B_{23} = B_{32} = B_{65} = B_{56} = -B_{53} = -B_{35} = -B_{62} = -B_{26} = 21\kappa_0$; $B_{33} = B_{66} = -B_{63} = B_{36} = 18\kappa_0$; $B_{11} = B_{12} = B_{13} = B_{14} = B_{15} = B_{16} = B_{21} = B_{24} = B_{31} = B_{34} = B_{41} = B_{42} = B_{43} = B_{44} = B_{45} = B_{46} = B_{51} = B_{54} = B_{61} = B_{64} = 0$ 。

$$K_s^e = \frac{1}{l} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \quad (27)$$

其中: $S_{11} = S_{44} = -S_{41} = -S_{14} = \chi_1$; $S_{12} = S_{21} = S_{15} = S_{51} = -S_{24} = -S_{42} = -S_{45} = -S_{54} = \frac{l}{2}\chi_1$; $S_{22} = S_{55} = \frac{l^2}{3}\chi_1$; $S_{25} = S_{52} = \frac{l^2}{6}\chi_1$; $S_{33} = S_{66} = \frac{3l^2}{5b^2}\chi_0$; $S_{36} = S_{63} = \frac{3l^2}{10b^2}\chi_0$; $S_{13} = S_{31} = S_{23} = S_{32} = S_{34} = S_{43} = S_{35} = S_{53} = S_{16} = S_{61} = S_{26} = S_{62} = S_{46} = S_{64} = S_{56} = S_{65} = 0$ 。

2.4 单元质量矩阵的建立

根据文献[19],采用有限元分析波形腹板钢箱-混凝土组合梁时,单元质量矩阵为

$$M = \frac{\rho Al}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

其中: M 为梁单元的单元质量矩阵; ρ 为梁单元的质量密度; A 为梁单元的截面面积; l 为梁单元的长度。

根据笔者所推导的单元刚度矩阵和单元质量矩阵,采用 Matlab 软件编制了计算波形腹板钢箱-混凝土

组合梁振动特性的 SFBOX 程序。限于篇幅,编程步骤不具体进行列举。

3 模型试验和有限元模型对比分析

3.1 波形腹板钢箱-混凝土组合梁的动力试验

选取我国正在建设的第 1 座波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥(即景中高速机场连接线主匝道高架桥)进行振动模态的实测,该桥的简支梁计算跨径为 29.22 m,桥梁布置形式为单箱四室截面,景中高速机场连接线主匝道高架桥的单箱截面构造如图 4 所示。

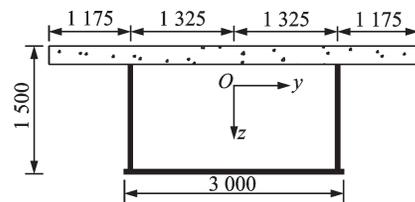


图 4 单箱截面构造图(单位: mm)

Fig.4 Cross-section structure diagram of a single box(unit:mm)

景中高速机场连接线主匝道高架桥的材料属性如表 1 所示。波形腹板钢箱-混凝土组合梁的混凝土顶板的厚度为 250 mm,波形钢腹板采用 1200 型,波形钢腹板和钢底板的厚度分别为 10 mm 和 16 mm。箱中共设置 6 道横隔板,钢底板上设置两道高度为 180 mm 的纵向加劲肋。

表 1 高架桥材料属性

Tab.1 Material properties of viaduct bridge

材料	弹性模量/MPa	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比
混凝土	3.5×10^4	2.5×10^3	0.2
钢材	2.1×10^5	7.8×10^3	0.3

采用东方所的 INV3060S 型 24 位动态信号采集仪对波形腹板钢箱-混凝土组合梁的振动频率和振型进行实测,数据采集如图 5 所示。箱梁顶板上采集器的平面布置图如图 6 所示。采样频率为 256 Hz,通过试验测得桥梁结构的功率谱图如图 7 所示,随后根据实测信号识别出各阶振动频率和振型。

3.2 ANSYS 模型的建立

采用 ANSYS 18.0 三维有限元软件建立了景中高速机场连接线主匝道高架桥的空间有限元模型。由于波形钢腹板、钢横隔板和钢底板的厚度很薄,采



图5 数据的采集
Fig.5 Data collection

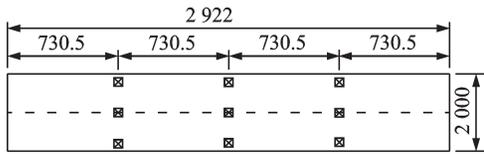


图6 箱梁顶板上采集器的平面布置图(单位: cm)
Fig.6 Plan view of the collector on the top of the box girder(unit: cm)

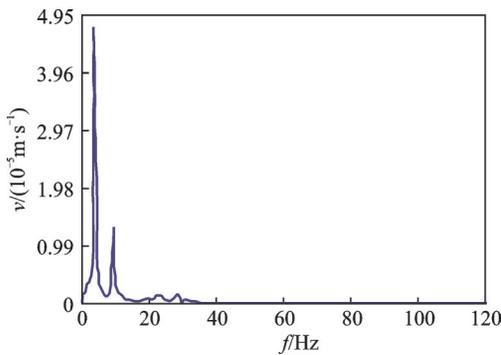


图7 实测频率功率谱
Fig.7 Measured frequency power spectrum

用壳单元 Shell 63 进行建模,混凝土顶板采用实体单元 Solid 45 进行建模。钢底板和波形钢腹板的连接处采用共节点的形式,混凝土顶板和波形钢腹板的连接处采用刚性连接。ANSYS 三维有限元模型的边界条件按简支梁设置,建立的景中高速机场连接线的主匝道高架桥空间有限元模型如图 8 所示。

3.3 有限元模型分析结果和实测结果对比

利用笔者编写的 SFBOX 程序计算波形腹板钢箱-混凝土组合梁的振动频率和模态时,将简支梁沿跨径方向划分为 50 个等长的梁单元,共 51 个结点。1 号结点为固定铰支座,将其位移 U_x , U_y 和 U_z 全部进行约束,51 号结点为活动铰支座,将位移 U_y , U_z 进行约束。表 2 为将 SFBOX 程序计算的振动频率与

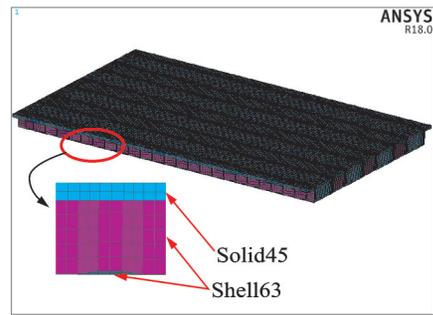


图8 主匝道高架桥空间有限元模型
Fig.8 3D finite element model of main ramp viaduct bridge

景中高速机场连接线主匝道高架桥的实测结果以及 ANSYS 空间有限元结果进行比较。其中: η 为 ANSYS 有限元值与 SFBOX 计算值之差与 SFBOX 计算值的比值; ξ 为实测值与 SFBOX 计算值之差与 SFBOX 计算值的比值。

表 2 不同方法下的振动频率比较

Tab. 2 Comparison of vibrating frequencies of different methods Hz

频率阶数	SFBOX 计算值	ANSYS 有限元值	实测值	η	ξ
1	3.634	3.621	3.762	0.36	3.52
2	12.612	12.735	12.379	0.98	1.85
3	23.879	24.360	24.531	2.01	2.73
4	35.765	36.973	—	3.37	—
5	47.685	49.061	—	2.88	—
6	59.481	61.953	—	4.16	—

从表 1 可以看出:采用笔者编写的 SFBOX 程序计算得到的波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥的振动频率与 ANSYS 空间有限元结果和实测结果的误差在 5% 以内,满足工程精度要求。这说明所提出的方法计算正确,结果可靠,具有较高的计算精度,使分析不同边界和荷载条件下的该桥型剪切剪滞问题变得简单易行,只需将复杂桥梁结构进行单元划分,输入截面参数,运行 SFBOX 程序,即可得到结构的振动频率和振型,计算过程大大简化,避免了建立 ANSYS 空间有限元模型的复杂性。可见,该方法具有广泛的工程实用性。

4 收敛速度分析

为了进一步研究笔者提出方法的收敛速度,将该波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥分别划分为 10,

20,30,40和50个等长度的梁单元,采用笔者编写的SFBOX程序对波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥的振动频率进行了分析,不同单元数下的前6阶振动频率如3所示。

表3 不同单元数下的前6阶振动频率

频率阶数	单元数				
	10	20	30	40	50
1	3.689	3.663	3.643	3.637	3.634
2	12.787	12.702	12.642	12.620	12.612
3	24.101	23.995	23.917	23.889	23.879
4	35.803	35.789	35.774	35.767	35.765
5	47.176	47.431	47.604	47.662	47.685
6	57.960	58.709	59.231	59.410	59.481

从表3可以看出,笔者提出方法的收敛速度很快,说明编写的SFBOX程序具有较高的计算精度,只需要较少的单元数,即可得到满意结果。

如表4所示,为了进一步研究提出方法的计算效率,将所编写的SFBOX程序与ANSYS空间有限元模型求解景中高速机场连接线主匝道高架桥的振动频率所需的求解时间进行比较。其中, ζ 为SFBOX程序结果与ANSYS有限元结果的比值。

表4 不同方法计算振动频率所需时间的比较

Tab.4 Comparisons of the time required for calculating the vibrating frequencies by different methods

计算方法	t/s
本研究方法	45.37
ANSYS模型	4 345.62
$\zeta/\%$	1.04

从表4可以看出,笔者所提方法的计算速度很快,采用笔者所编写的SFBOX程序求解景中高速机场连接线主匝道高架桥的振动频率所需的计算时间仅为用ANSYS空间有限元模型求解用时的1.04%,大大缩短了计算时间,提高了计算效率。

5 结论

1) 采用笔者编写的SFBOX程序计算得到的波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥的振动频率与ANSYS空间有限元结果和实测结果的误差在5%以内,验

证了笔者所编写的波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥振动频率求解程序的可靠性。

2) 通过对波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥振动频率的分析,验证了SFBOX程序具有较高的计算精度。在分析波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥的动力特性时,只需要较少的单元数量,即可达到较高的计算精度。

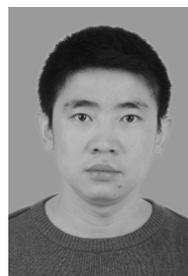
3) SFBOX程序的计算速度很快,故采用SFBOX程序求解波形腹板钢箱-混凝土组合梁桥的振动频率,计算简便,大大缩短了振动特性求解的计算时间,提高了计算效率。

4) 研究成果适用于不同边界条件和荷载条件下箱梁的剪切剪滞问题,只需将复杂结构进行单元划分,输入截面参数,运行SFBOX程序,即可得到结构的动力特性,使得计算大大简化,避免了ANSYS有限元模型建立和求解的复杂性,该方法具有广泛的工程实用性。

参 考 文 献

- [1] NIE J G, ZHU Y J, TAO M X, et al. Optimized prestressed pontinuous pomposite girder bridges with corrugated steel webs [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(2): 1-17.
- [2] JOHN T, NICHOLAS T, GREGORY H. Direct strength method for shear capacity of beams with corrugated webs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 137: 152-160.
- [3] SHEN K J, WAN S, MO Y L, et al. Behavior of single-box multi-cell box-girders with corrugated steel webs under pure torsion. part I: experimental and numerical studies [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 129: 542-557.
- [4] YUAN S C, DONG J F, WANG Q Y, et al. Fatigue property study and life assessment of composite girders with two corrugated steel webs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 141: 287-295.
- [5] KÖESDI B, JER B, DUNAI L. Bending and shear interaction behavior of girders with trapezoidally corrugated webs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121(6): 383-397.
- [6] CHEN X C, PANDEY M, BAI Z Z, et al. Long-term behavior of prestressed concrete bridges with corrugated steel webs[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(8): 1-9.
- [7] 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. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] 罗奎, 冀伟, 马万良. 考虑剪切变形效应下波形钢腹板组合箱梁的矩阵分析方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(10): 2505-2513.
- LUO Kui, JI Wei, MA Wanliang. Matrix analysis method considering shear deformation effect for composite box girder with corrugated steel webs [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16 (10) : 2505-2513. (in Chinese)
- [10] 刘保东, 李祖硕, 陈海波, 等. 变截面波形钢腹板连续组合箱梁破坏试验研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(3): 38-44.
- LIU Baodong, LI Zushuo, CHEN Haibo, et al. Research on the failure experiment on the continuous composite box girder with variable cross-section corrugated steel webs[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(3): 38-44. (in Chinese)
- [11] 李立峰, 周聪, 王连华, 等. 基于纽玛克法的变截面波形钢腹板组合箱梁畸变效应分析[J]. 中国公路学报, 2018, 31(6): 217-226.
- LI Lifeng, ZHOU Cong, WANG Lianhua, et al. Analysis on distortion effect of non-prismatic composite box girders with corrugated steel webs based on newmark method [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(6): 217-226. (in Chinese)
- [12] 周聪, 李立峰, 王连华, 等. 基于软化薄膜元理论的波形钢腹板PC组合箱梁纯扭全过程分析[J]. 土木工程学报, 2018, 51(10): 97-106.
- ZHOU Cong, LI Lifeng, WANG Lianhua, et al. Full-range analysis of prestressed composite box girders with corrugated steel webs subject to pure torsion based on softened membrane theory [J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(10): 97-106. (in Chinese)
- [13] 桂水荣, 张政韬, 陈水生. 结构参数对大跨波形钢腹板箱梁桥动力特性的影响[J]. 桥梁建设, 2018, 48(4): 39-44.
- GUI Shuirong, ZHANG Zhengtao, CHEN Shuisheng. Influences of structural parameters on dynamic characteristics of long span box girder bridges with corrugated steel webs [J]. Bridge Construction, 2018, 48 (4) : 39-44. (in Chinese)
- [14] 郑尚敏, 万水, 程海根. 单箱多室波形钢腹板组合箱梁动力特性研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(9): 41-46.
- ZHENG Shangmin, WAN Shui, CHENG Haigen. Research on the dynamic characteristics of multi-room Single box composite girder with corrugated steel webs[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(9): 41-46. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 冀伟, 邓露, 刘世忠, 等. 多跨等截面波形钢腹板PC连续箱梁桥竖向弯曲振动频率的计算[J]. 振动与冲击, 2016, 35(18): 140-146.
- JI Wei, DENG Lu, LIU Shizhong, et al. Calculation of the vertical bending vibration frequencies of multi-span PC continuous box girder bridge with corrugated steel webs of uniform cross-section [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35 (18) : 140-146. (in Chinese)
- [17] 冀伟, 刘世忠, 蔺鹏臻, 等. 波形钢腹板连续箱梁桥振动频率的参数分析[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(4): 771-776.
- JI Wei, LIU Shizhong, LIN Pengzhen, et al. Calculation and study on bending vibration frequencies of the PC continuous box girder with corrugated steel webs [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(4): 771-776. (in Chinese)
- [18] 张士铎, 邓小华, 王文州. 箱型薄壁梁剪力滞效应[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998: 19-21.
- [19] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 302-304.



第一作者简介:冀伟,男,1982年6月生,博士、教授。主要研究方向为组合桥梁结构设计理论。曾发表《波形钢腹板PC简支箱梁桥的扭转振动频率分析》(《振动、测试与诊断》2017年第37卷第4期)等论文。

E-mail:jiwei1668@163.com