

Calculation of Bending and Shear Deformations of Non-Prismatic Corrugated Steel Web Composite Box Girders Based on Simpson Formula

Menglin Ma¹, Zuocai Wang^{1,2*}, Weixin Ren^{1,2}

¹School of Civil and Hydraulic Engineering, HeFei University of Technology, Hefei Anhui

²New Theory and Technology Research Platform of Bridge Structure Safety Monitoring, Hefei University of Technology, Hefei Anhui

Email: 729422419@qq.com, *wangzuocai@hfut.edu.cn

Received: Mar. 4th, 2018; accepted: Mar. 20th, 2018; published: Mar. 27th, 2018

Abstract

To study the non-prismatic corrugated steel web composite box girder bending and shear deformations, this paper derived the Simpson formula based equivalent moment of inertia method to calculate the bending and shear deformations of non-prismatic corrugated steel web composite box girders subjected to concentrated and distributed loads. A non-prismatic corrugated steel web composite box girder with considering the cantilever length of 80 m, is simulated as an example. The bending and shear deformations of the girder subjected to concentrated and distributed loads are obtained based on the proposed methods. For comparison, the finite element models of the girder established by using beam elements, solid-shell elements are also created to calculate the bending and shear deformations. To compare with the deformations calculated by the solid-shell element model, the errors of the calculated bending and shear deformations under the concentrated load based on the proposed methods are 1.3% and 13.4%, respectively, and the errors of the calculated bending and shear deformations under the concentrated load based on the beam element model are 4.6% and 34.1%, respectively. The bending and shear deformations are also obtained for the box girder under distributed loads. To compare with the bending and shear deformations calculated by the solid-shell element model, the errors of the bending and shear deformations based on the proposed methods are 2.8% and 15.8%, respectively, and the errors of the bending and shear deformations based on the beam element model are 5.5% and 29.7%, respectively. In this paper, the shear contribution of the top and bottom concreted flanges is also quantitatively studied. Since the proposed method considered the shear effect of the top and bottom flanges, the calculated deformation is more consistent with the result calculated from the solid-shell element model. The results of this paper show that the calculated bending and shear deformations based on the proposed method are in a good agreement with the results obtained from the entity-shell element model, and the proposed method can be applied into the bending and shear deformations calculation of the non-prismatic corrugated steel web composite box girder with relatively high efficiency and resolution.

*通讯作者。

Keywords

Corrugated Steel Web, Bending Deformation, Shear Deformation, Equivalent Moment of Inertia, Simpson Formula

基于辛普森公式的变截面波形钢腹板组合箱梁弯曲和剪切变形计算

马梦琳¹, 王佐才^{1,2*}, 任伟新^{1,2}

¹合肥工业大学, 土木与水利工程学院, 安徽 合肥

²合肥工业大学, 桥梁结构安全监测新理论与新技术研究中心, 安徽 合肥

Email: 729422419@qq.com, *wangzuocai@hfut.edu.cn

收稿日期: 2018年3月4日; 录用日期: 2018年3月20日; 发布日期: 2018年3月27日

摘要

为研究变截面波形钢腹板组合箱梁弯曲和剪切变形计算问题, 本文基于辛普森积分公式, 推导了计算变截面波形钢腹板组合箱梁在集中荷载和自重荷载作用下弯曲和剪切变形的等效惯性矩法。以一实际单箱单室变截面波形钢腹板组合箱梁为算例, 考虑施工过程中的最大悬臂80 m时的工况, 利用所提方法计算了其受集中荷载和自重荷载作用下的弯曲和剪切变形。为对比分析, 通过建立悬臂梁的梁单元模型和实体-壳单元模型, 分别计算了悬臂梁在集中荷载和自重荷载作用下的弯曲和剪切变形。与实体-壳单元模型计算的弯曲和剪切变形相比, 集中荷载作用下等效惯性矩法计算的弯曲和剪切变形误差分别为1.3%和13.4%, 梁单元模型计算结果误差分别为4.6%和34.1%; 自重荷载作用下等效惯性矩法计算的弯曲和剪切变形误差分别为2.8%和15.8%, 梁单元模型计算结果的误差分别为5.5%和29.7%。同时基于顶底板混凝土对剪切变形影响的定量分析表明, 由于考虑了顶底板混凝土的抗剪效应, 利用等效惯性矩方法计算的剪切变形更接近实体-壳单元模型计算结果。结果表明, 提出的变截面波形钢腹板组合箱梁弯曲和剪切变形计算方法结果吻合良好, 计算效率较高, 适合波形钢腹板组合箱梁在施工过程中的变形分析计算。

关键词

波形钢腹板, 弯曲变形, 剪切变形, 等效惯性矩, 辛普森公式

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

波形钢腹板 PC 组合箱梁桥结构作为一种新型的钢-混凝土组合结构, 其顶底板为钢筋混凝土结构, 腹板为波形钢板, 预应力采用体外或体内与体外相结合的结构形式。该结构充分利用了混凝土抗压强度

高, 波形钢腹板抗剪屈服强度高的优点, 有效的将钢、混凝土两种材料进行了融合, 提高了材料利用率, 是一种较为经济、合理、高效的结构形式[1] [2] [3] [4]。

与传统的预应力混凝土箱梁相比, 它无论是在结构形式还是受力性能方面均有诸多特点, 结构方面, 波形钢腹板代替混凝土腹板使自重减轻, 并且由于腹板特有的折叠形状, 剪切刚度要在钢板剪切模量的基础上进行折减; 受力性能方面, 波形钢腹板是组合箱梁的剪力的主要承担者, 混凝土顶板和底板主要起到抗弯的作用, 充分发挥了材料特性[5] [6] [7]。同时, 由于混凝土顶底板又对截面抗剪有贡献, 波纹腹板也对抗弯也有一定贡献, 忽略它们之间的作用, 虽然使得计算的截面抗力偏于安全和保守。但是在桥梁施工阶段中, 对波纹钢腹板的变形的控制和计算精度要求比较高, 如果计算的变形偏于保守, 会使得计算结果与实际结构发生的变形产生较大的误差, 给波纹钢腹板梁的安装和变形控制带来困难[8] [9] [10] [11]。

国内外学者对波形钢腹板组合箱梁的变形计算进行了较多研究。其中, Ezzeldin Yazeed [12]提出基于弹性弯曲理论的推导公式, 通过假定位移场, 建立内力平衡方程、变形协调条件和物理方程, 依据边界条件及荷载条件求出解析解; 但实际中梁的边界条件、荷载状况较复杂, 难以获得解析解。刘保东[13]等根据波形钢腹板特点, 基于变分原理, 结合微分方程及相关的边界条件, 利用欧拉公式推导了考虑箱梁剪力滞和剪切变形的波形钢腹板变形计算公式, 结果表明剪力滞对计算结果的影响较小, 变形值仅增大了 1.3%。李宏江、叶见曙等[14]基于 Timoshenko 梁理论, 推导出了等截面波形钢腹板组合箱梁的变形计算公式, 其中, 混凝土顶底板仅起到抗弯作用, 腹板仅起到抗剪作用, 简单有效, 但忽略了混凝土顶底板的抗剪能力, 其计算结果偏大。在此基础上, 国内外学者采用共轭梁法和等效刚度法等近似等效方法进行了改进。上述方法应用于变截面波形钢腹板箱梁时都有一定的难度。

本文基于辛普森积分公式, 推导了箱梁的等效惯性矩、顶底板的等效厚度和钢腹板的等效高度的计算公式, 建立了箱梁在集中荷载和自重荷载作用下的弯曲变形和剪切变形的计算公式, 并且利用等截面剪应力计算公式得到了腹板承担的剪力比例。通过单箱单室变截面波形钢腹板组合箱梁算例, 利用等效惯性矩法分别计算了其在集中荷载和自重荷载作用下的弯曲变形和剪切变形, 并与梁单元模型和实体-壳单元模型进行了对比, 结果显示集中荷载作用下等效惯性矩法计算的弯曲变形和剪切变形误差分别为 1.3% 和 13.4%, 梁单元模型计算的误差分别为 4.6% 和 34.1%; 自重荷载作用下的等效惯性矩法计算的弯曲变形和剪切变形误差分别为 2.8% 和 15.8%, 梁单元模型计算误差分别为 5.5% 和 29.7%。最后, 通过顶底板混凝土对剪切变形影响的定量分析, 表明由于考虑了顶底板混凝土的抗剪能力, 利用等效惯性矩方法计算的剪切变形, 更接近实体-壳单元模型计算结果。本文建立的基于辛普森公式的波形钢腹板组合箱梁变形计算方法计算简便, 计算精度较高, 且避免了复杂积分计算和模型建立, 计算效率较高。适合波施工过程中的变形分析计算。

2. 波形钢腹板组合箱梁的截面特性

2.1. 波形钢腹板轴向受力特性

波形钢腹板组合箱梁截面, 是在传统的混凝土箱梁截面基础上用波形钢腹板替代混凝土腹板的组合箱梁, 由于其“手风琴”构造特征如图 1 所示, 轴力作用下, 轴向变形大, 故其表观弹性模量小[15]。波形钢腹板纵向表观弹性模量与钢板的弹性模量 E_0 、波高 h 、板厚 t 以及波纹形状系数 r 有关, 可按下式计算:

$$E_x = 2rE_0 \left(\frac{t}{h} \right) \quad (1)$$

计算所得表观弹性模量仅为钢板模量的几分之一, 因此设计上一般忽略波形钢腹板的轴向受力问题, 认为轴向力仅由混凝土顶底板承担。

2.2. 波形钢腹板组合箱梁抗弯等效截面

由于波形钢腹板纵向表观弹性模量和轴向刚度很小，可忽略腹板对截面的抗弯作用。因此，计算箱梁抗弯惯性矩时，仅考虑混凝土顶底板的作用，其等效截面如图 2 所示。

波形钢腹板箱梁受弯时，若不考虑波形钢腹板的作用，则混凝土顶底板的纵向正应力分布基本符合线性的特征，因此计算波形钢腹板组合箱型梁变形时采用这一“拟平截面假定” [16] [17]。

2.3. 波形钢腹板有效剪切模量

Johnson RP [18]等研究发现，剪力作用下波形钢板的剪切模量有所降低，提出了有效剪切模量，其计算公式为：

$$G_e = G \frac{b+d}{b+d \sec a} \quad (2)$$

式中： a 、 b 、 d 为波形钢腹板尺寸，其意义如图 1 所示； G 为钢板的抗剪弹性模量， $G = E_0 / [2(1 + \mu)]$ ，其中 μ 泊松比[19] [20]。

3. 变截面波形钢腹板箱梁变形计算的等效惯性矩方法

与等截面梁不同，波形钢腹板变截面梁的惯性矩沿长度方向变化，等截面变形曲线公式不再适用，本文基于辛普森公式，建立适用于变截面梁的等效惯性矩方法，在此基础上分别研究集中荷载和自重荷载作用下的悬臂梁弯曲和剪切变形的等效计算方法。

3.1. 变截面波形钢腹板弯曲变形计算

3.1.1. 等效惯性矩的推导

根据材料力学的卡氏第二定理，集中荷载作用下悬臂梁自由端的端部位移的计算公式为：

$$y = \int_0^l \frac{P\xi^2}{EI_{ce}} d\xi = \frac{Pl^3}{3EI_{ce}} \quad (3)$$

式中： I_{ce} 为等效梁的等效惯性矩。

为求出等效惯性矩 I_{ce} ，采用辛普森积分公式计算最大悬臂的变形值：

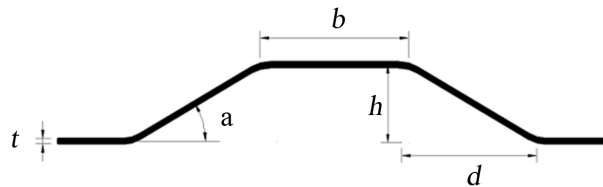


Figure 1. Cross section of corrugated steel web
图 1. 波形钢腹板截面

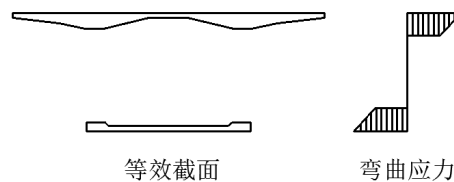


Figure 2. Equivalent cross section diagram
图 2. 等效截面示意图

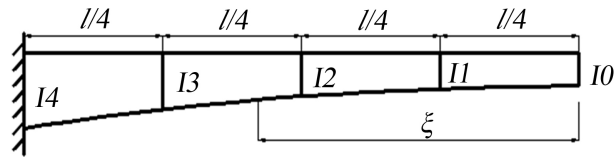


Figure 3. Calculation of simple diagram by equivalent moment of inertia

图 3. 等效惯性矩法计算简图

$$\int_0^l f(\xi) d\xi = \frac{l-0}{3n} \times [f(0) + 4(f(1) + f(3) + \dots + f(n+1)) + 2(f(2) + f(4) + \dots + f(n-2)) + f(n)] \quad (4)$$

式中: $f(\xi)$ 为被积分函数由(3)式得到:

$$f(\xi) = \frac{P\xi^2}{EI_j} \quad (5)$$

将变截面悬臂波形钢腹板箱梁等分成四个节段, $I_j (j=0,1,2,3,4)$ 表示各截面相对于中性轴的惯性矩, 如图 3 所示。

弯矩作用下的位移可以写成:

$$y = \frac{Pl^3}{3EI_{ce}} = \frac{Pl^3}{12E} = \frac{1}{4I_1} + \frac{1}{2I_2} + \frac{1}{4I_3} + \frac{1}{I_4} \quad (6)$$

简化上式后可得等效惯性矩 I_{ce} 为:

$$I_{ce} = \frac{16}{1/I_1 + 2/I_2 + 9/I_3 + 4/I_4} \quad (7)$$

3.1.2. 集中荷载作用下的弯曲变形公式

根据材料力学, 承受弯矩、剪力共同作用的直梁, 除了弯矩作用下产生弯曲变形外, 剪力作用亦会产生剪切变形, 即相邻截面间的竖直相互滑动[17]。设弯矩引起的弯曲变形为 y_1 , 并取位移向下为正, x 轴向右为正:

$$\frac{d^2 y_1}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (8)$$

集中荷载作用下悬臂梁自由端梁截面弯矩为 $M(x) = P(l-x)$, l 为梁长度, P 为集中荷载。对式(16)积分得:

$$\frac{dy_1}{dx} = \frac{P}{2EI} (l-x)^2 + C_1 \quad (9)$$

根据边界条件 $y_1'(0) = 0$, 可得 $C_1 = Pl^2/2EI$, 代入式(9)即:

$$\frac{dy_1}{dx} = \frac{P}{EI} \left(lx - \frac{x^2}{2} \right) \quad (10)$$

对式(10)积分可得:

$$y_1 = \frac{P}{EI} \left(\frac{l}{2} x^2 - \frac{x^3}{6} \right) + C_2 \quad (11)$$

将边界条件 $y_1(0)=0$ ，代入式(11)式得到 $C_2=0$ 。故集中荷载作用下的弯曲变形公式为：

$$y_1 = \frac{P}{E_c I_{ce}} \left(\frac{l}{2} x^2 - \frac{x^3}{6} \right) \quad (12)$$

只考虑顶底板混凝土的抵抗弯矩作用，因此抗弯刚度为 $E_c I_{ce}$ ，其中 E_c 为混凝土弹性模量， I_{ce} 为上下混凝土板对中性轴的等效惯性矩。

3.1.3. 自重荷载作用下的弯曲变形计算

变截面箱梁的自重荷载可简化为梯形形式，如图 4 所示。梯形的上下底长度根据梁的实际重量选定， δ 为上底与下底的长度的比值。

根据几何计算可得梁重 ω ：

$$\omega = \frac{(1+\delta)ql}{2} \quad (13)$$

式中 $q = 2\omega/(1+\delta)l$ 为定值，则悬臂梁在自重荷载作用下：

$$\frac{d^2 y_1}{dx^2} = \frac{q(1+\delta)(l+x)^3}{6E_c I_{ce} l} + \frac{\delta q(l-x)^2}{2E_c I_{ce}} \quad (14)$$

对式(14)积分得：

$$\frac{dy_1}{dx} = \frac{q(1+\delta)(l+x)^4 - 4\delta ql(l-x)^3}{24E_c I_{ce} l} + D_1 \quad (15)$$

带入边界条件 $y_1'(0)=0$ ，可以得到：

$$D_1 = \frac{(3\delta-1)ql^3}{24EI} \quad (16)$$

故式(16)可以写成：

$$\frac{dy_1}{dx} = \frac{q(l+\delta)(l+x)^4}{24E_c I_{ce} l} - \frac{\delta ql(l-x)^3}{6E_c I_{ce} l} + \frac{(3\delta-1)ql^3}{24E_c I_{ce}} \quad (17)$$

对式(17)积分得：

$$y_1 = \frac{q(1+\delta)(l+x)^5}{120E_c I_{ce} l} + \frac{\delta ql(l-x)^4}{24E_c I_{ce} l} + \frac{(3\delta-1)ql^3}{24E_c I_{ce}} + D_2 \quad (18)$$

把边界条件 $y_1(0)=0$ ，带入式(18)可以计算得到：

$$D_2 = -\frac{(1+6\delta)ql^4}{120E_c I_{ce}} \quad (19)$$

故集中荷载作用下的弯曲变形计算公式为：

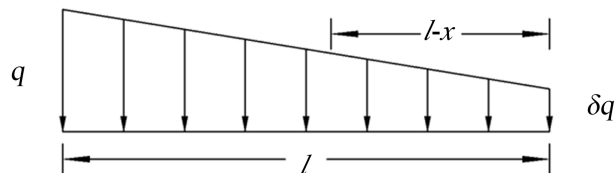


Figure 4. Equivalent load diagram of self weight load
图 4. 自重荷载等效示意图

$$y_1 = \frac{q(1+\delta)(l+x)^5}{120E_c I_{ce} l} + \frac{\delta ql(l-x)^4}{24E_c I_{ce} l} + \frac{(3\delta-1)ql^3}{24E_c I_{ce}} - \frac{(1+6\delta)ql^4}{120E_c I_{ce}} \quad (20)$$

3.2. 变截面波形钢腹板剪切变形计算

3.2.1. 变截面波形钢腹板截面等效

变截面波形钢腹板组合箱梁的钢腹板截面面积随着梁的长度变化, 利用辛普森积分公式将其等效为等截面波形钢腹板, 等效截面面积 A_e :

$$A_e = 2t/l \int_0^l f(\xi) d\xi \quad (21)$$

式中 $f(\xi)$ 为钢腹板沿梁长度方向的截面高度曲线, t 为钢腹板厚度。将式(21)代入辛普森积分公式, 得到波形钢腹板的等效截面面积:

$$A_e = \frac{t \int_0^l 2f(\xi) d\xi}{l} = \frac{t}{6} [f(0) + 4(f(1) + f(3)) + 2f(2) + f(4)] \quad (22)$$

同理可以计算出等效截面顶板和底板厚度。

3.2.2. 变截面波形钢腹板箱梁剪应力计算公式

由于波形钢腹板箱梁特殊的受力方式, 计算时一般仅考虑钢腹板的抗剪作用, 偏保守与实际不符。因此, 本文通过计算截面的剪应力分布, 推算混凝土顶底板和波形钢腹板的剪力承担比例, 从而考虑混凝土顶底板的抗剪作用。

变截面梁的等效剪应力计算公式:

$$\tau = \frac{QS}{bI} \quad (23)$$

τ 为截面计算点的剪应力, Q 为截面所受剪力, S 为横截面上过所求切应力点的横线以外部分的面积对中性轴的面积矩, b 为截面计算点的宽度, I 为截面惯性矩。由于是组合箱梁, 须考虑剪应力计算点分别位于顶板、腹板及底板三种情况。

1) 当剪应力计算点在顶板内时:

$$S = b_t y \left(y_c - \frac{y}{2} \right) \quad (24)$$

2) 当剪应力计算点在腹板内时:

$$S = b_t t_t \left(y_c - \frac{t_t}{2} \right) \quad (25)$$

3) 当剪应力计算点在底板内时:

$$S = b_t t_t \left(y_c - \frac{t_t}{2} \right) - b_b (y + t_b - h) \times \left(\frac{y + h - t_b - 2y_c}{2} \right) \quad (26)$$

b_t 、 t_t 分别为顶板的宽度和高度, b_b 、 t_b 分别为底板的宽度和高度, y_c 为截面形心, h 为截面高度。波纹钢腹板的剪力承担比例:

$$\rho_w = \frac{\int \tau_w dA}{Q} \quad (27)$$

式中: ρ_w 波形钢腹板剪力承担比例, τ_w 波形钢腹板的剪应力。

剪切变形引起的剪切变形 y_2 :

$$y_2 = \frac{K\rho_w P(x)x}{G_e A_e} \quad (28)$$

式中的波形钢腹板有效剪切模量可由式(2)得到, $G_e = 0.9G$ 。由于梁截面剪应力分布并非均匀, 引入应力非均匀系数 K 。对于波形钢腹板组合箱梁来说, 剪应力沿腹板高度接近于等值分布, K 取 1.0。

4. 算例分析

选取悬臂长度为 80 m 的单箱单室变截面波形钢腹板组合箱梁为研究对象, 箱梁几何尺寸如图 5。箱梁结构混凝土强度为 C60, 弹性模量 $E_c = 3.60 \times 10^4$ MPa, 抗压强度标准值 $f_{ck} = 38.5$ MPa, 抗拉强度标准值 $f_{tk} = 2.85$ MPa, 泊松比 0.2。波形钢腹板弯折形式为波浪形, 选用 Q345 钢板, 弹性模量 $E_0 = 2.10 \times 10^5$ MPa, 泊松比 $\mu = 0.3$ 。自由端作用集中荷载 1000 kN, 自重荷载为 20687.64 kN。

4.1. 有限元计算模型

采用桥梁有限元分析程序 Midas Civil 和 Abaqus 有限元分析软件分别建立梁单元和实体-壳单元模型。其中, Midas Civil 梁单元模型, 悬臂梁分为 18 个单元, 如图 6 所示。考虑到横隔板对结构整体影响不大, 忽略其影响效应。组合箱梁的模拟计算采用程序中的波形钢腹板截面。

为了验证理论计算的准确性, 利用有限元软件 Abaqus 对该箱梁进行实体建模以及荷载作用和边界条件的模拟, 三维实体模型, 如图 7 所示。其中, 采用 C3D8R 单元模拟混凝土结构; 采用 S4R 壳单元模拟波形钢腹板结构; 在分析计算中, 假设波形钢腹板与混凝土顶底板完全连接, 无相对滑移或剪切连接破坏; 波形钢腹板具有足够的屈曲强度, 无任何形式的屈曲破坏; 不考虑钢筋以及混凝土的非线性的影响。

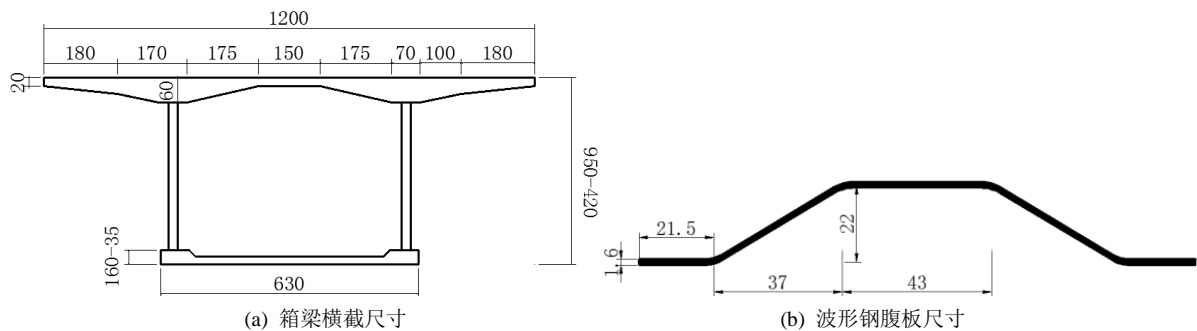


Figure 5. Section diagram of 80 m cantilever variable cross-section corrugated steel web box girder

图 5. 80 m 悬臂变截面波形钢腹板箱梁截面图

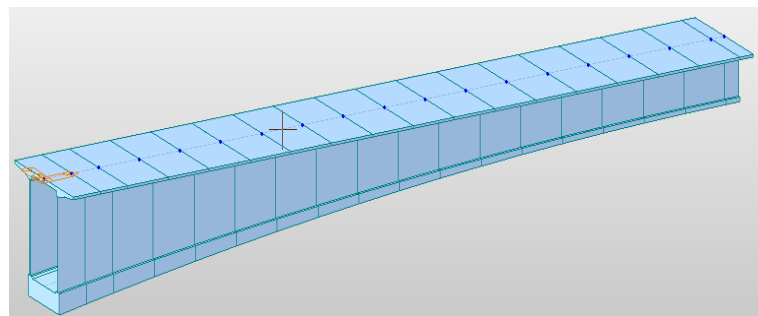


Figure 6. Beam element model

图 6. 梁单元模型

4.2. 等效截面参数计算

利用建立的等效计算方法, 得到悬臂波形钢腹板组合箱梁的等效顶板厚度、底板厚度、钢腹板高度和截面惯性矩, 其中顶板厚度不变, 按照设计块段划分选择计算截面, 如表 1 所示。

4.3. 弯曲变形分析

利用公式(20)、(28)和表 1 中的惯性矩, 可得该梁在集中荷载和自重荷载作用下的弯曲变形。

在集中荷载作用下两种方法计算的弯曲变形值相对于实体-壳单元模型计算的弯曲变形值误差都较

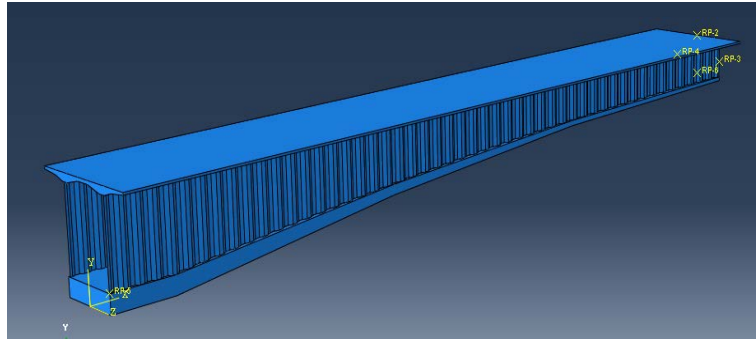


Figure 7. Solid shell element model
图 7. 实体-壳单元模型

Table 1. Equivalent post composite box beam parameters
表 1. 等效后组合箱梁参数

悬臂长度(m)	底板厚度(cm)	腹板厚度(cm)	惯性矩(m ⁴)
3.2	145	709	295
6.4	140	694	286
11.2	133	671	272
16	127	649	259
20.8	120	629	246
25.6	114	609	233
30.4	109	591	220
35.2	103	573	207
40	98	556	195
44.8	94	541	183
49.6	89	526	171
54.4	85	512	160
59.2	81	499	149
64	78	487	139
68.8	75	477	129
73.6	72	467	121
78.4	69	458	112
80	69	455	110

小，最大悬臂状态下梁单元误差为 4.6%；等效惯性矩法误差为 1.3%，相对于梁单元误差更小，如图 8 所示。在自重荷载作用下，最大悬臂状态下的误差梁单元为 5.5%；等效惯性矩法误差为 2.8%，如图 9 所示。

4.4. 剪切变形分析

为验证计算的剪切变形的准确性，与梁单元模型和实体-桥单元模型所计算的剪切变形进行比较；梁单元模型的剪切变形由考虑剪切变形的总变形值和不考虑剪切变形的弯曲变形值差值得到；实体-壳单元模型的剪切变形通过约束该梁变形时的转角得到。

计算结果如图 10 所示，由图可知在集中荷载作用下提出的等效方法计算的剪切变形值相对于梁单元模型计算值更加精确，随着悬臂长度的增加，等效惯性矩法计算值与实体-单元模型计算值误差逐渐减小，最大悬臂状态下等效惯性矩法的误差为 13.4%，而梁单元模型计算的误差为 34.1%。

自重荷载作用下的剪切变形如图 11 所示，由图可知利用等效惯性矩法计算的剪切变形相对于梁单元模型更加精确，最大悬臂状态下梁单元计算值误差 29.7%，等效惯性矩法计算值误差为 15.8%。

由于梁单元模型默认的有效抗剪面积为钢腹板截面面积，并不考虑混凝土的抗剪能力，故导致计算的剪切变形值偏大。

5. 顶底板混凝土抗剪能力对剪切变形的影响分析

该梁在自重荷载作用下各截面的波形钢腹板剪应力如图 12 所示，计算中假设腹板剪应力沿腹板高度均匀分布。由图可以看出，利用等截面梁计算公式计算得到的腹板剪应力相对与腹板承受全部剪力时的

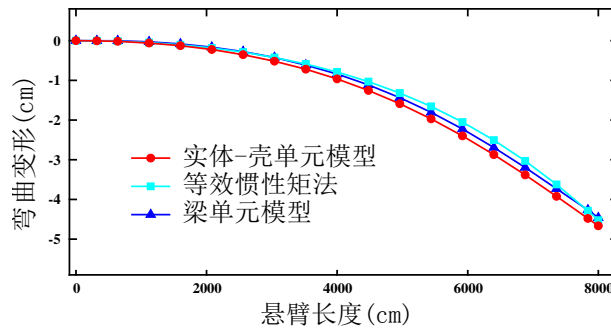


Figure 8. Calculation of bending deformation under concentrated load by different methods

图 8. 不同方法计算在集中荷载作用下的弯曲变形

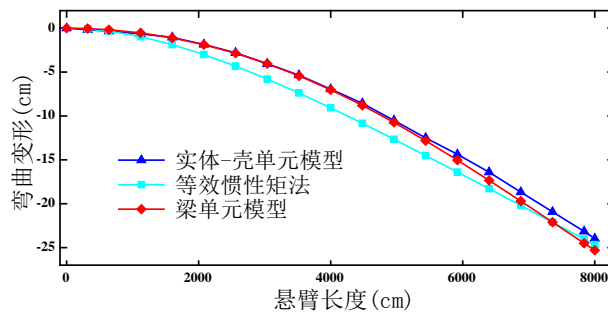


Figure 9. Bending deformation calculated by different methods under the action of self weight load

图 9. 不同方法计算在自重荷载作用下的弯曲变形

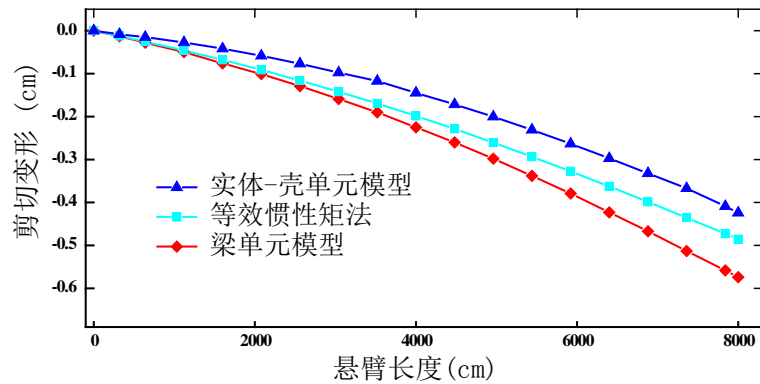


Figure 10. Calculation of shear deformation under concentrated load by different methods

图 10. 不同方法计算在集中荷载作用下的剪切变形

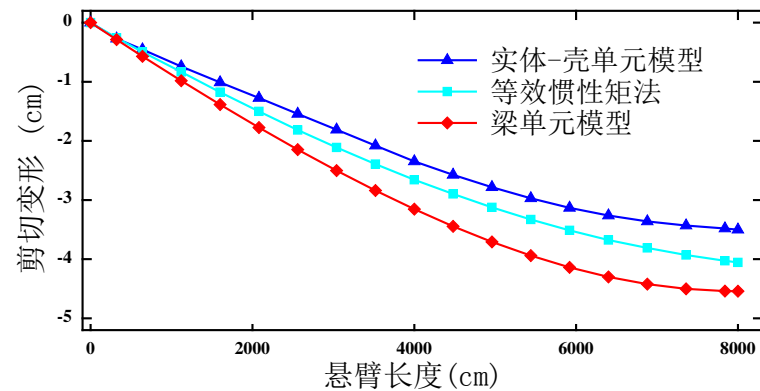


Figure 11. Calculation of shear deformation under the action of self weight load by different methods

图 11. 不同方法计算自重荷载作用下的剪切变形

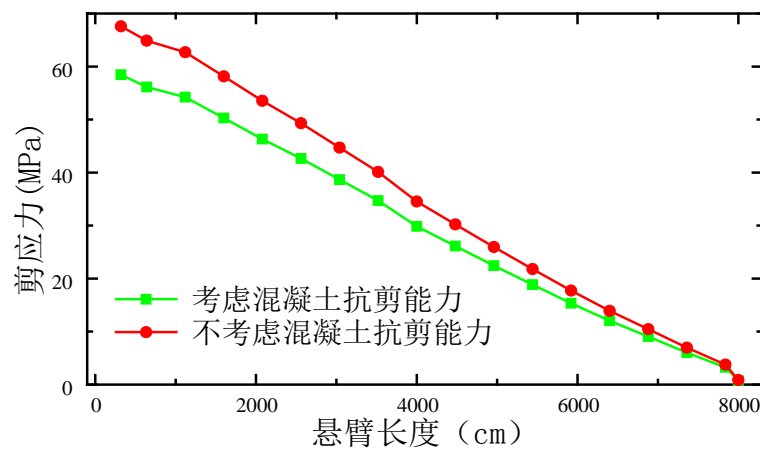


Figure 12. Shear stress comparison of steel web

图 12. 钢腹板剪应力对比

剪应力要小，这是由于考虑了混凝土顶底板的抗剪作用，因此计算结果更加精确；该梁梁端固结处截面的腹板实际承担剪力的比例 86.5%，与腹板承受全部剪力时的剪切变形进行比较，如图 13 所示。由于腹板承受的剪力变小，故剪切变形相应减小，且与实体-壳单元模型计算值更加吻合，考虑混凝土抗剪能力

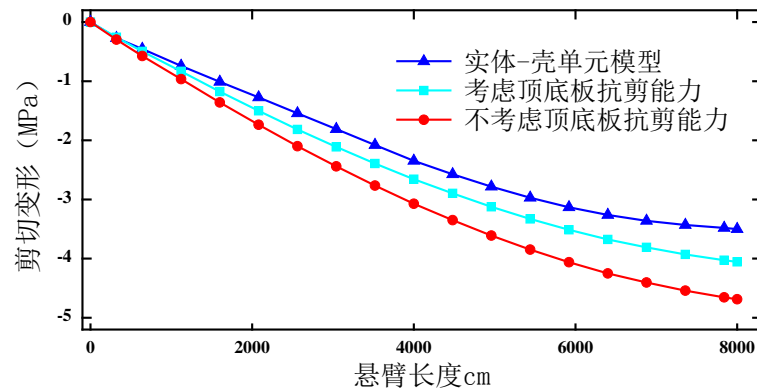


Figure 13. Shear deformation under different shear load ratio of the web
图 13. 腹板不同剪力承载比下的剪切变形

时的剪切变形误差为 15.8%，不考虑混凝土抗剪能力的剪切变形误差为 33.9%。

6. 结论

1) 实体-壳单元模型可以真实反映波形钢腹板的受力情况，但建模过程复杂，计算效率不高；梁单元模型计算结果误差较大，波形钢腹板的安装对变形精度要求较高；本文基于辛普森公式计算的等效惯性矩，避免了当惯性矩沿截面变化时繁琐的积分计算，利用等效惯性矩计算得到的弯曲变形和剪切变形与实体-壳单元模型的计算结果吻合度较高。

2) 本文基于辛普森积分公式，将波形钢腹板组合箱梁的变截面形式等效为等截面，建立了计算变截面波形钢腹板组合箱梁变形的等效惯性矩法，该计算方法考虑了混凝土的抗剪能力，计算结果更贴近实际。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(51578206, 51478159)；安徽省杰出青年科学基金(1708085J06)；中央高校基本科研业务费专项资金项目(PA2017GDQT0022)。

参考文献

- [1] 陈春宝, 黄卿维. 波形钢腹板 PC 箱梁桥应用综述[J]. 公路, 2005(7): 45-53.
- [2] 万水, 李淑琴, 马磊. 波形钢腹板预应力混凝土组合箱梁结构在中国桥梁工程中的应用[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2): 15-20.
- [3] 贾慧娟. 变截面波形钢腹板 PC 组合箱梁桥结构性能研究[M]. 南京: 东南大学, 2015.
- [4] 陈宣言. 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: 1-3.
- [5] 张华南. 单箱三室波形钢腹板 PC 组合连续箱梁桥的受力性能研究[M]. 南京: 东南大学, 2009.
- [6] 周期源, 高轩能. 考虑剪切变形影响时变截面梁的挠度计算[J]. 南昌大学学报(工科版), 2006, 28(3): 295-298.
- [7] 苏俭, 刘钊. 波形钢腹板箱梁考虑剪切变形影响的挠度计算方法[J]. 中外公路, 2010, 30(3): 143-147.
- [8] 陈建兵, 万水, 俞文兵, 等. 波形钢腹板 PC 组合箱梁弯曲性能理论分析与试验研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2004, 28(1): 14-17.
- [9] 万水, 陈建兵, 袁安华, 俞文兵. 波形钢腹板 PC 组合箱梁简化计算及试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2005, 22(1): 11-14.
- [10] 聂建国, 李法雄. 考虑腹板剪切变形行为的波形钢腹板梁理论模型[J]. 中国公路学报, 2011, 24(6): 40-47.
- [11] 陈建兵, 李淑琴, 万水. 悬臂波形腹板组合箱梁挠度计算方法研究[J]. 苏州科技学院学报, 2011, 21(4): 5-8.
- [12] Ezzeldin Yazeed, S.-A. (2011) Behaviour of Steel and Composite Girders with Corrugated Steel Webs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **28**, 656-672.

- [13] 刘保东, 任红伟, 李鹏飞. 考虑波纹钢腹板特点的挠度分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(3): 21-26.
- [14] 李宏江, 叶见曙, 万水. 剪切变形对波形钢腹板箱梁挠度的影响[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 17-20.
- [15] 李立峰, 刘志才, 王芳. 波形钢腹板组合箱梁弹性阶段弯曲理论及模型试验研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(1): 69-73.
- [16] 吴文清, 叶见曙, 万水. 波形钢腹板-混凝土组合箱梁截面变形的拟平截面假定及其应用研究[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 178-198.
- [17] 刘保东, 李祖硕, 胥睿. 变截面波形钢腹板连续刚构桥拟平截面假定试验研究[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(1): 28-41.
- [18] Johnson, R.P. and Cafolla, J. (1997) Corrugated Webs in Plate Girders for Bridges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures*, **123**, 157-164. <https://doi.org/10.1680/istbu.1997.29305>
- [19] Zhou, M., Zhang, J., Zhong, J., et al. (2016) Shear Stress Calculation and Distribution in Variable Cross Sections of Box Girders with Corrugated Steel Webs. *Journal of Structural Engineering*, **142**, 16-22. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001477](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001477)
- [20] Zhou, M., Liu, Z., Zhang, J., et al. (2016) Equivalent Computational Models and Deflection Calculation Methods of Box Girders with Corrugated Steel Webs. *Engineering Structures*, **127**, 615-634. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.047>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org