

# 考虑畸变效应的钢桁腹-混凝土组合箱梁 横向内力计算方法

套格套, 丁南宏\*, 冀伟, 刘奇  
(兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 为合理分析偏心荷载作用下钢桁腹-混凝土组合箱梁的横向内力, 对钢桁腹杆进行等效处理, 参考框架分析法的基本原理, 建立了考虑畸变效应的钢桁腹-混凝土组合箱梁横向内力计算公式。结合该类组合箱梁的结构特点和受力特性, 提出了新的翘曲应力分布模式, 并推导得到新应力分布模式下的畸变翘曲系数计算公式。通过将公式解与有限元解进行对比, 发现二者吻合良好, 计算误差均在10%以内, 尤其在底板位置处精度更高, 验证了推导公式的正确性和新应力分布模式的合理性。此分析方法可反映出箱梁畸变和横向框架作用对该类组合箱梁横向内力的影响。对荷载偏心距、高跨比和悬臂板宽度进行参数分析, 结果表明: 随着荷载偏心距的增加, 该类组合箱梁角点处的横向弯矩变化规律与混凝土箱梁的规律不同, 主要是由于钢桁腹杆对顶底板的约束程度降低; 该类组合箱梁的横向弯矩随着高跨比的增加而增加, 增长规律呈曲线分布; 选择合适的悬臂板宽度可有效降低钢桁腹-混凝土组合箱梁的横向弯矩。

**关键词:** 钢桁腹-混凝土组合箱梁; 横向内力; 翘曲应力; 框架分析法; 畸变效应

中图分类号: U448.21<sup>+</sup>3

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)02-0001-08

DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20230913001

## Calculation Method of Transverse Internal Force of Concrete Composite Box Girder with Steel Truss Webs Considering Distortion Effect

TAO Getao, DING Nanhong\*, JI Wei, LIU Qi

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

\*Corresponding author: dingnanhong@mail.lzjtu.cn

**Abstract:** In order to reasonably analyze the transverse internal forces of concrete composite box girder with steel truss webs under eccentric load, an equivalent treatment of steel truss webs was carried out, and a calculation formula of the transverse internal force of concrete composite box girder with steel truss webs was established by referring to the basic principle of frame analysis. According to the structural and mechanical characteristics of this kind of composite box girder, a new warping stress distribution model was proposed, and the calculation formula of warping coefficient of distortion under the new stress distribution model was obtained. By comparing the proposed solution with the finite element solution, it was found that the two solutions were in good agreement, with calculation errors all below 10%, especially at the position of the bottom plate, validating the correctness of the derived formula and the

收稿日期: 2023-09-13

基金项目: 国家自然科学基金(51708269)

作者简介:

套格套(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事钢-混凝土组合桥梁结构设计理论方面的研究。E-mail: 1950085390@qq.com。

通信作者:

丁南宏(1972—), 男, 博士, 教授, 主要从事新型桥梁结构设计理论方面的研究。E-mail: dingnanhong@mail.lzjtu.cn。

rationality of the new stress distribution model. This analysis method can reflect the influence of warping and transverse frame action on the transverse internal forces of the composite box girder. The parameters of load eccentricity, height-to-span ratio and cantilever plate width were analyzed. The results show that with the increase of load eccentricity, the transverse bending moment at corner point of the composite box girder is different from that of the concrete box girder, which is mainly due to the decrease of the constraint degree of the steel bar on the top and bottom plate. The transverse bending moment of this kind of composite box girder increases with the increase of height-to-span ratio, and the growth law shows a curve distribution. The transverse bending moment of concrete composite box girder with steel truss webs can be effectively reduced by selecting the appropriate cantilever plate width.

**Keywords:** concrete composite box girder with steel truss webs; transverse internal force; warping stress; frame analysis method; distortion effect

钢桁腹-混凝土组合箱梁是一种将钢桁腹杆直接与上、下翼板连接形成的新型组合结构<sup>[1]</sup>。由于使用钢桁腹杆代替了传统箱梁中的混凝土腹板<sup>[2]</sup>,解决了箱梁腹板容易开裂的问题,并有效减轻了箱梁自重,减小了下部结构承受的荷载。由于其诸多优点,此类结构正逐步得到广泛应用,同时国内外学者也对其开展了相关理论研究。TAN等<sup>[3]</sup>通过静力模型试验对钢桁腹-混凝土组合箱梁连接节点的受力性能和破坏模式进行了研究。MACHACEK等<sup>[4]</sup>对桁架桥中上弦杆与混凝土桥面板的连接体系进行了试验研究。杭子豪等<sup>[5]</sup>通过引入奇异函数建立了组合梁的挠曲微分方程,并通过求解得到了顶底板在不同荷载下的挠曲函数。杨霞林等<sup>[6]</sup>结合钢桁腹式混凝土组合箱梁的结构特点,推导出了此类箱梁闭口断面的混凝土顶底板和换算钢腹板的扭转翘曲应力表达式。李永鹏等<sup>[7]</sup>采用新畸变中心定义符合钢桁腹-混凝土组合箱梁畸变变形特征的畸变角,运用能量变分法建立畸变控制微分方程,并给出了初参数解。目前,钢桁腹-混凝土组合箱梁的受力特性相关研究主要集中在弯曲、扭转和畸变,而对偏心荷载作用下横向内力分析方法的研究较少。

对于钢桁腹式混凝土组合箱梁,其抗扭和纵横向抗弯刚度与普通混凝土箱梁相比均有所减弱,所受横向内力也会有所改变。而采用板理论对桥面板横向内力进行分析又无法考虑扭转和畸变变形对组合箱梁横向受力的影响<sup>[8]</sup>。因此,本文采用换算薄壁箱梁法对钢桁腹杆进行等效处理,并依据框架分析法的基本原理,建立了考虑畸变效应影响的钢桁腹-混凝土组合箱梁横向内力计算公式。与普通混凝土箱梁相比,组合箱梁腹杆的面内挠曲刚度减小<sup>[9]</sup>,导致抵抗畸变变形的横向框架作用减弱。本文结合钢桁腹-混凝土组合箱梁的结构特点以及力学特性,提出了新的应力分布模式,并得到新应力分布模式下的畸变翘曲系数计算公式。本文分析方法可反映出箱梁畸变和横向框架作用对该类组合箱梁横向内力的影响。

## 1 钢桁腹-混凝土组合箱梁的等效

钢桁腹-混凝土组合箱梁的构造如图1所示<sup>[10]</sup>。钢桁腹杆的应用虽然使钢桁腹-混凝土组合箱梁的自重降低、通透性提高,但不利于使用框架分析法进行分析,因此采用换算薄壁箱梁法对钢桁腹杆进行换算。

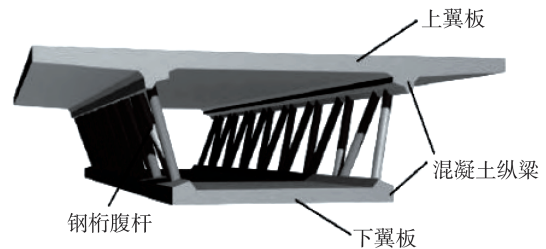


图1 钢桁腹-混凝土组合箱梁构造

Fig. 1 Construction of concrete composite box girder with steel truss webs

根据换算前后剪切变形相等原则,将钢桁腹杆换算成薄钢腹板<sup>[7,11]</sup>,如图2所示,换算钢腹板厚度为:

$$t_B = \frac{E_s A_G l a}{2 G_s l_1^3} \quad (1)$$

式中: $E_s$ 、 $G_s$ 分别为钢材弹性模量和剪切模量; $l_1$ 为钢桁腹杆长度; $l$ 为组合箱梁节间长度; $A_G$ 为钢桁腹杆横截面积; $a$ 为组合箱梁腹板高度。

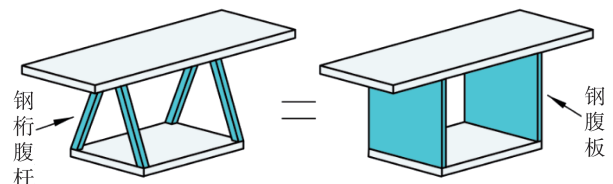


图2 等效换算

Fig. 2 Equivalent conversion

为计算方便,对材料进行统一处理,将钢腹板进一步等效为混凝土腹板。根据剪切变形相等原则,等效后的混凝土腹板厚度 $t_h = (G_s / G_c) \cdot t_B$ ,其中 $G_c$ 为混凝土剪切模量。

## 2 组合箱梁横向内力分析方法

采用框架分析法可将箱梁横向内力计算的三维空间问题转化为二维平面框架问题,同时也能反映腹板对顶底板横向挠曲的影响。根据薄壁箱梁理论,利用框架分析法分析偏心荷载作用下箱形梁横向内力时,可以分为两部分:加支承的框架分析和释放支承的结构分析<sup>[12]</sup>。第1部分即在桥长方向上添加连续分布的刚性支撑,并在计算断面处取单位长度(1 m)的微元框架,其框架内力和支承反力可通过结构力学方法计算得出。第2部分即将第1部分中得到的支承反力以大小相等、方向相反的方式施加至原结构上进行分析。所施加的力可分解为对称荷载和反对称荷载,如图3所示。对称荷载作用下箱梁的横向内力相对较小,通常忽略不计<sup>[13]</sup>。以下重点讨论反对称荷载作用下的箱梁横向内力。

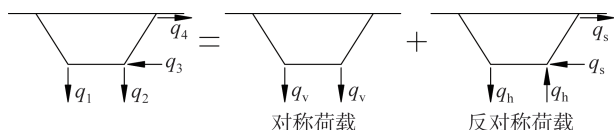


图3 荷载分解

Fig. 3 Load decomposition

### 2.1 剪力差及畸变翘曲系数

箱梁截面尺寸如图4所示,设框架顶、底板和腹板的扭转剪力差分别为 $V'_s$ 、 $V'_x$ 和 $V'_h$ ,畸变剪力差分别为 $T'_s$ 、 $T'_x$ 和 $T'_h$ 。

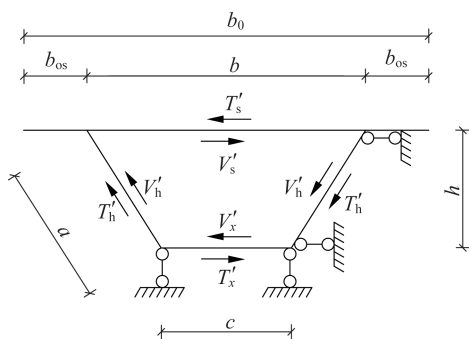


图4 箱梁截面尺寸

Fig. 4 Sectional dimensions of box girder

箱形梁横截面上的剪力流具有连续性,因此底板与腹板交点处(角点)平均扭转剪力流相等,即:

$$\frac{V'_x}{c} = \frac{V'_h}{a} \quad (2)$$

式中: $c$ 为箱梁底板宽度。

箱梁在竖向偏心荷载作用下产生畸变,畸变翘曲应力在横截面上呈直线分布,并在各板平面内产生畸变内力矩。与普通混凝土箱梁不同的是,钢桁腹-混凝土组合

箱梁由于其腹杆的不连续性,由翘曲应力产生的弯矩大部分由顶底板承担,但顶底板对腹杆有约束作用,腹杆仍可提供一定的纵向抗弯刚度以承担弯矩。由圣维南原理可知,顶底板对腹杆的约束作用仅在腹杆横向尺寸内有影响,其他位置处的应力均接近0 MPa,可忽略。此外,根据变形协调条件,各角点处必须具有相同的翘曲正应力<sup>[14]</sup>。基于组合箱梁这一受力特性,本文提出一种新的翘曲应力分布模式,如图5所示,以准确反映其真实受力状态。

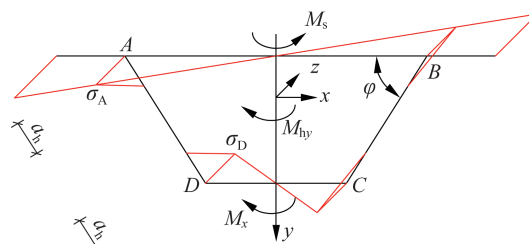


图5 翘曲正应力

Fig. 5 Warping normal stress

图5中 $\sigma_A$ 和 $\sigma_D$ 分别为角点A和角点D的畸变翘曲应力。畸变内力矩 $M_s$ 、 $M_x$ 和 $M_{hy}$ 的表达式分别为:

$$M_s = \frac{\sigma_A t_s}{6} \alpha_0^3 b^2 \quad (3)$$

$$M_x = \beta \frac{\sigma_A t_x}{6} c^2 \quad (4)$$

$$M_{hy} = \frac{1}{2} a_h t_h \sigma_A \left[ \beta \left( c + \frac{2}{3} a_h \cos \varphi \right) - \left( b - \frac{2}{3} a_h \cos \varphi \right) \right] \quad (5)$$

式中: $\beta$ 为畸变翘曲系数; $\alpha_0 = b_0/b$ ;  $t_s$ 为顶板厚度; $b$ 为顶板宽度; $b_0$ 为顶板和两侧悬臂板宽度之和; $t_x$ 为底板厚度; $a_h$ 为钢桁腹杆横向尺寸; $\varphi$ 为顶板与腹板之间的夹角。

由畸变翘曲应力对 $y$ 轴的自平衡关系可得: $M_s - M_x - M_{hy} = 0$ ,将对应表达式代入后即可求得新应力分布模式下畸变翘曲系数 $\beta$ 的计算式:

$$\beta = \frac{\alpha_0 b_0^2 t_s + a_h t_h (3b - 2a_h \cos \varphi)}{c^2 t_x + a_h t_h (3c + 2a_h \cos \varphi)} \quad (6)$$

根据初等梁理论可得各剪力差之间的关系为:

$$T'_x = \frac{\beta}{\alpha_0^3} \left( \frac{c}{b} \right)^2 \frac{t_x}{t_s} T'_s \quad (7)$$

$$T'_h = \frac{3a_h t_h}{t_s \alpha_0^3 b^2} \left[ \frac{a(1 + \beta^2)}{1 + \beta} - \frac{a_h(1 + \beta)}{3} \right] T'_s \quad (8)$$

### 2.2 位移协调关系

设框架顶、底板反弯点处的剪力分别为 $Q_s$ 和 $Q_x$ ,腹板反弯点将梁高分成如图6所示的比例为 $1/\eta_m$ 的上、下两段,其中 $\eta_m$ 为表示反弯点位置的系数。

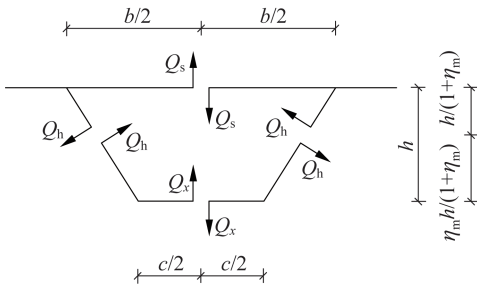


图6 框架剪力

Fig. 6 Shear forces of frame

从图6中角点A和角点D的弯矩平衡可得:

$$Q_h = \frac{1 + \eta_m}{2} \frac{b}{a} Q_s \quad (9)$$

$$Q_h = \frac{1 + \eta_m}{2\eta_m} \frac{c}{a} Q_x \quad (10)$$

式中:  $Q_h$ 为腹板处的剪力。

框架沿y轴对称,在反对称荷载作用下,其变形反弯点必然位于上、下板中点处,且弯矩为零。因此可采用如图7所示的半框架模型计算框架竖向位移。由图6和图7中剪力和等效外力荷载在垂直方向的平衡关系可得:

$$F_m = \frac{2a}{1 + \eta_m} \left( \frac{\eta_m}{c} + \frac{1}{b} \right) Q_h \quad (11)$$

式中:  $F_m$ 为等效外力荷载;  $\eta_m = (2 + \frac{c}{b} + \frac{b I_h}{a I_s}) / (1 + \frac{2c}{b} + \frac{c^2 I_h}{ab I_x})$ ,可通过式(9)与式(11)求得。其中,  $I_s = t_s^3 / [12(1 - \mu^2)]$ ,  $I_x = t_x^3 / [12(1 - \mu^2)]$ ,  $I_h = t_h^3 / [12(1 - \mu^2)]$ ,分别为考虑泊松比时顶板、底板和腹板的横向抗弯惯性矩,  $\mu$ 为材料的泊松比。

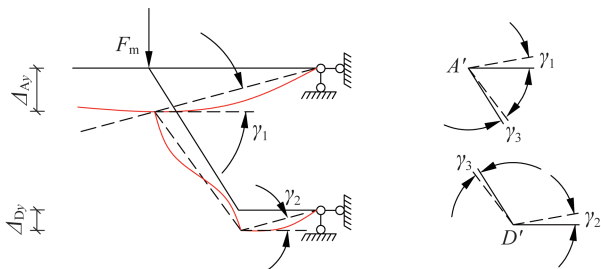


图7 半框架模型

Fig. 7 Half-frame model

在竖向反对称荷载作用下框架发生畸变,设角点A和角点D的竖向位移分别为  $\Delta_{Ay}$ 和  $\Delta_{Dy}$ ,顶板、底板和腹板畸变角分别为  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 和  $\gamma_3$ ,如图7所示。在小变形情况下可认为  $\gamma_3 \approx 0$ ,则:

$$\gamma_1 = \frac{2\Delta_{Ay}}{b} \quad (12)$$

$$\gamma_2 = \frac{2\Delta_{Dy}}{c} \quad (13)$$

利用结构力学方法可求得在等效外力荷载  $F_m$ 作用下角点A和角点D的竖向位移  $\Delta_{Ay}$ 、 $\Delta_{Dy}$ 分别为:

$$\Delta_{Ay} = \Delta_{Dy} = \frac{a^2 c \eta_1}{24 E I_h} Q_h \quad (14)$$

$$\eta_1 = \frac{4 + \frac{4c}{b} \frac{I_s}{I_x} + \frac{6a}{b} \frac{I_s}{I_h} + \frac{2c}{a} \frac{I_h}{I_x}}{1 + \left( \frac{c}{b} \right)^2 \frac{I_s}{I_x} + \frac{3a(b+c)}{b^2} \frac{I_s}{I_h}} \quad (15)$$

式中:  $\eta_1$ 为箱梁横截面尺寸系数;  $E$ 为材料弹性模量。

框架发生变形时角点A和角点D的相对转角为  $\gamma_A$ 和  $\gamma_D$ ,由几何关系可得:

$$\gamma_A = \gamma_1 - \gamma_3 \approx \gamma_1 \quad (16)$$

$$\gamma_D = \gamma_2 - \gamma_3 \approx \gamma_2 \quad (17)$$

偏心竖向荷载作用下箱梁发生如图8所示的畸变变形,各板的畸变位移可表示为:

$$\begin{cases} \Delta_s = \alpha \frac{T'_s}{E J_s} \\ \Delta_x = \alpha \frac{T'_x}{E J_x} \\ \Delta_h = \alpha \frac{T'_h}{E J_h} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $J_s = \frac{t_s b^3}{12}$ 、 $J_h = \frac{t_h a^3}{12}$ 、 $J_x = \frac{t_x c^3}{12}$ ,分别为各板在自身平面内的抗弯惯性矩;系数  $\alpha$ 的值取决于箱梁的支撑条件、荷载形式和计算截面位置。

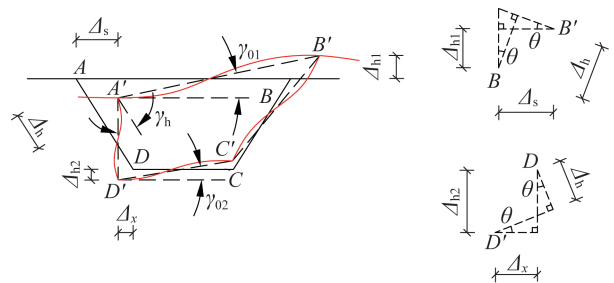


图8 箱梁畸变位移

Fig. 8 Distortion displacements of box girder

根据图7和图8中的几何关系可知,箱梁面内位移和各畸变角满足下列关系:

$$\gamma_{01} = 2 \left( \frac{\Delta_h}{b} \frac{a}{h} - \frac{\Delta_s}{b} \frac{b-c}{2h} \right) \quad (19)$$

$$\gamma_{02} = 2 \left( \frac{\Delta_h}{c} \frac{a}{h} + \frac{\Delta_x}{c} \frac{b-c}{2h} \right) \quad (20)$$

$$\gamma_h = \frac{\Delta_s + \Delta_x}{h} \quad (21)$$

式中:  $\gamma_{01}$ 、 $\gamma_{02}$ 和  $\gamma_h$ 分别为箱梁顶板、底板和腹板位置处的

畸变角;  $h$  为箱梁高度。

本文根据框架竖向位移与箱梁畸变位移的协调关系进行计算,这与文献[15]中推导的框架分析法有所区别。由本文协调关系可得:

$$\gamma_{01} + \gamma_h = \gamma_A \quad (22)$$

$$\gamma_{02} + \gamma_h = \gamma_B \quad (23)$$

式中:  $\gamma_B$  为角点  $B$  的相对转角。

式(22)、(23)相加可得:  $\gamma_{01} + \gamma_{02} + 2\gamma_h = \gamma_A + \gamma_B$ , 将各表达式代入并整理可得:

$$\frac{\alpha}{E} \left( \frac{2a}{ch} \frac{T'_h}{J_h} + \frac{1}{h} \frac{T'_s}{J_s} + \frac{b}{ch} \frac{T'_x}{J_x} \right) = \frac{\eta_1 a^2}{12EI_h} Q_h \quad (24)$$

### 2.3 内、外力平衡关系

释放虚设支承后,作用在薄片框架上的反力可以分解为正对称荷载  $q_v$ 、水平反对称荷载  $q_s$  及竖向反对称荷载  $q_h$ 。

#### 2.3.1 竖向力平衡

根据图9中的竖向力平衡关系可得:

$$Q_s + Q_x + \frac{h}{a} (T'_h + V'_h) = q_h \quad (25)$$

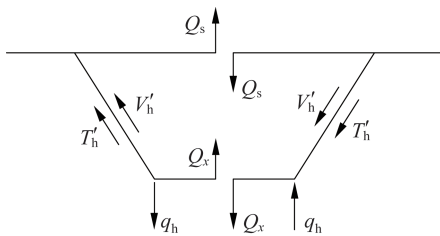


图9 竖向力平衡

Fig. 9 Equilibrium of vertical forces

#### 2.3.2 力矩平衡

如图10所示,以两个腹板交点为矩心,基于框架下半部分各力的转动平衡关系可得:

$$\left( 2 + \frac{2\eta_m}{1 + \eta_m} \frac{b - c}{c} \right) Q_h = \frac{h}{a} (q_s + V'_x - T'_x) + \frac{b - c}{a} q_h \quad (26)$$

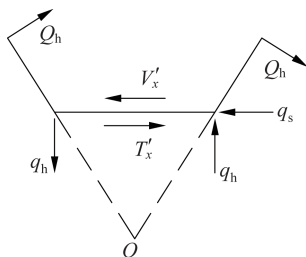


图10 力矩平衡

Fig. 10 Moment balance

将式(2)、式(7)~(10)和式(24)~(26)通过MATLAB软件进行编程求解,即可得到框架内剪力  $Q_s$ 、 $Q_x$ 、 $Q_h$ ,继而可用式(27)、(28)计算框架各角点处的横向弯矩。

$$M_A = M_B = \frac{b}{2} Q_s \quad (27)$$

$$M_C = M_D = \frac{b}{2} Q_x \quad (28)$$

钢桁腹-混凝土组合箱梁的最终横向弯矩由添加刚性支承的框架弯矩和释放支承的框架弯矩(反对称荷载作用下)两部分叠加而成。本文中的公式虽然基于斜腹板箱梁进行推导,但同样适用于直腹板箱梁,只需取  $a = h$ 、 $c = b$ 、 $\varphi = 0^\circ$  即可对直腹板箱梁进行计算。

## 3 算例

### 3.1 数值算例

选用文献[16]中的一座公路桥作为算例,忽略加劲肋,其截面参数如图11所示。该简支钢桁腹-混凝土组合箱梁桥计算跨径为31.2 m,在距离梁中轴线1 m处作用有  $10 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$  的均布荷载。混凝土弹性模量为  $3.45 \times 10^4 \text{ MPa}$ ,泊松比为0.167。钢桁腹杆弹性模量为  $2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ ,泊松比为0.3,长度为2.5 m,矩形截面规格为  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ ,节间距为2.4 m。全桥采用ANSYS软件建模,使用Shell181单元进行模拟,如图12所示。顶板、底板与钢桁腹杆之间通过共节点连接,以模拟实桥中无滑移剪力件的连接效果。模型分别约束一端的3个自由度 ( $U_x = U_y = U_z = 0$ ) 和另一端的2个自由度 ( $U_y = U_z = 0$ )。最终的横向弯矩结果通过定义单元表的方式提取,图13为通过有限元分析获得的顶底板横向应力云图。

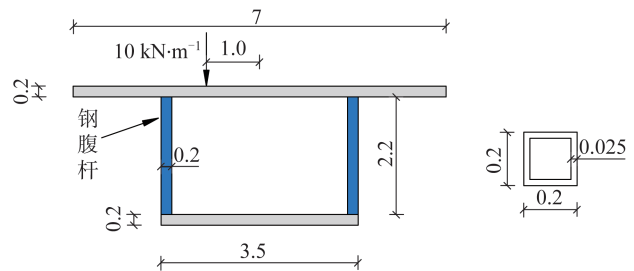


图11 组合箱梁截面参数(单位:m)

Fig. 11 Sectional parameters of composite box girder (unit: m)

表1为采用文献[15]方法和本文方法计算该简支梁横向弯矩时的关键系数。通过对比可知,在计算直腹板箱梁时两种方法得到的横截面尺寸系数  $\eta_1$  和表示反弯点位置的系数  $\eta_m$  相等,而畸变翘曲系数  $\beta$  有所不同。本文采用新的翘曲应力分布模式是导致  $\beta$  不同的主要原因。

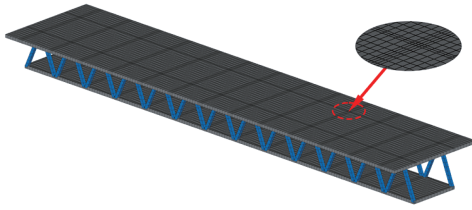


图12 ANSYS计算模型

Fig. 12 ANSYS calculation model

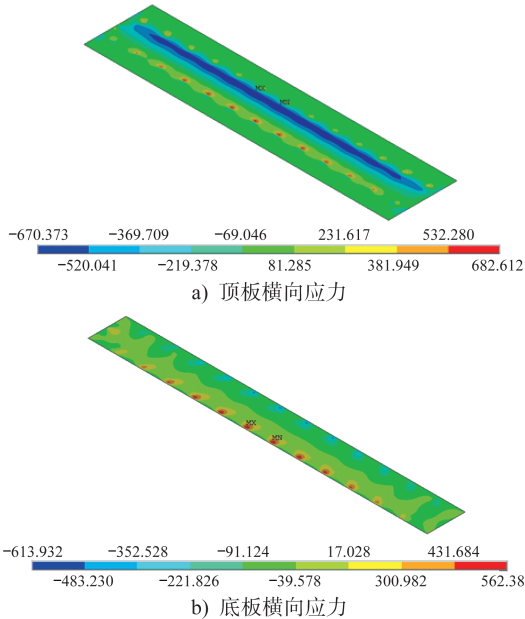


图13 顶板和底板横向应力(单位:MPa)

Fig. 13 Transverse stresses of top and bottom slabs (unit: MPa)

但在计算斜腹板箱梁时,两种方法计算所得的3个系数均将有所不同。

表1 关键系数计算结果

Table 1 Calculation values of key coefficients

系数	文献[15]方法	本文方法
$\eta_1$	1.01	1.01
$\eta_m$	1.00	1.00
$\beta$	6.09	7.77

将按文献[15]方法和按本文方法计算的横向弯矩和有限元解整理于表2中(表中弯矩值对应单位长度箱梁,且以箱梁内侧受拉为正)。

由表2可以看出按本文分析方法计算得到的横向弯矩值与有限元解吻合良好,验证了本文所推导公式的正确性和新应力分布模式的合理性。由于跨中截面处有两个钢桁腹杆与顶板连接,出现了应力集中现象,使顶板位置处的计算精度相对较低,其中最大误差出现在角点A

表2 跨中截面各角点横向弯矩

Table 2 Transverse bending moments at each corner of mid-span section

计算角点	文献[15]解/ (kN·m)	本文解/ (kN·m)	有限元解/ (kN·m)	相对误差/ %
A	0.630	0.411	0.453	9.27
B	-0.764	-0.544	-0.589	7.64
C	0.756	0.516	0.546	5.49
D	-0.670	-0.451	-0.487	7.39

注:相对误差=(有限元解-本文解)×100%/有限元解。

处,为9.27%,满足工程使用精度要求。而采用文献[15]方法计算该类组合箱梁横向弯矩时误差较大,不宜直接采用,需结合该类组合箱梁的结构特点和受力特性进行相应调整。因此,本文提出的分析方法更加适用于该类组合箱梁横向弯矩的计算,能够提高计算精度,尤其是在底板位置处精度更高。

为讨论钢桁腹杆对组合箱梁横向弯矩的影响程度,与相同截面参数混凝土箱梁(图14)的计算结果进行对比。

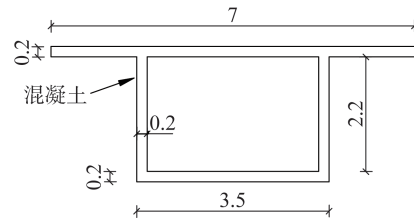


图14 相同截面参数混凝土箱梁(单位:m)

Fig. 14 Concrete box girder with identical cross-sectional parameters (unit: m)

由图15中的对比结果(括号中数值表示混凝土箱梁的横向弯矩值)可知,采用纵向不连续的钢桁腹杆代替混凝土腹板时,对顶底板的约束程度降低,导致各角点处的横向弯矩均小于混凝土箱梁的横向弯矩,竖向偏心荷载作用位置处的横向弯矩则相对较大,与混凝土箱梁的横向弯矩相比增加了48%。

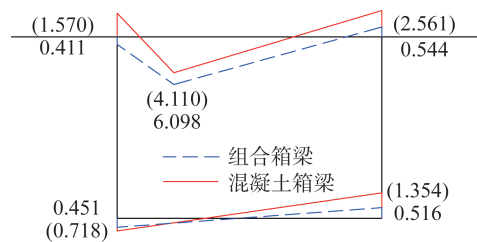


图15 单位长度箱梁横向弯矩对比(单位:kN·m)

Fig. 15 Comparison of lateral bending moments per unit length of box girders (unit: kN·m)

## 3.2 参数分析

### 3.2.1 荷载作用位置

以算例中的组合箱梁截面为研究对象,在不改变截面几何尺寸的前提下,通过调整荷载偏心距 $e$ 进行分析。由于该箱梁具有对称性,因此仅需考虑偏心荷载在箱梁中心线左侧移动的情况。偏心荷载从距离箱梁中心线0.25 m的位置移动至距离箱梁中心线1.50 m的位置,增量为0.25 m。不考虑偏心荷载作用在悬臂板上的情况。该组合箱梁角点A、角点C以及荷载作用位置处的横向弯矩变化如图16所示。

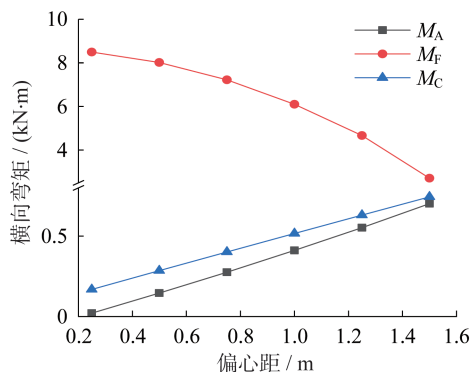


图16 偏心距对单位长度箱梁横向弯矩的影响

Fig. 16 Influence of eccentricities on lateral bending moments per unit length of box girders

从图16中可以看出,钢桁腹-混凝土组合箱梁角点A和角点C处的横向弯矩随着荷载偏心距的增加而逐渐增大,而在荷载作用位置处则呈现出相反的趋势。当荷载偏心距从0.25 m增加至1.50 m时,角点C处的横向弯矩增加了3.43倍,荷载作用位置处的横向弯矩减小了0.68倍。由文献[17]可知,混凝土箱梁角点A处的横向弯矩随偏心距的增大呈下降趋势,这与该组合箱梁同一位置处横向弯矩的变化规律有所不同。产生这种差异的主要原因在于该类组合箱梁中钢桁腹杆的使用降低了对顶底板的约束,减弱了横向框架作用。

### 3.2.2 高跨比

在不改变算例中组合箱梁箱室高度和其他截面参数的前提下,将组合箱梁桥的计算跨径从26.4 m增加至38.4 m,步长为2.4 m。图17为组合箱梁跨中截面横向弯矩在不同高跨比下的变化情况。

高跨比的变化虽然不影响等效板厚度的取值,但会影响系数 $\alpha$ 的取值,从而对最终的横向内力结果产生影响。从图17中可以看出,随着高跨比的增加,组合箱梁各角点的横向弯矩也逐渐增加,增长规律大致相同,总体呈曲线分布。当高跨比小于0.07时,随着高跨比的增加,组合箱梁各角点处的横向弯矩增量更大。在同一高跨比

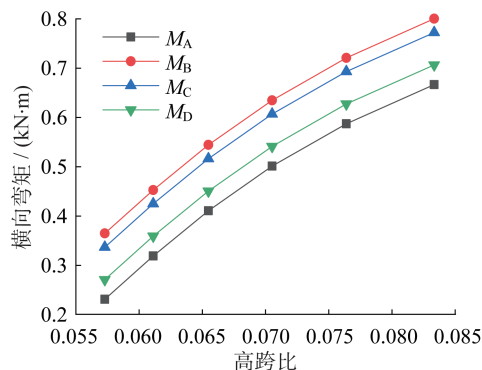


图17 高跨比对单位长度箱梁横向弯矩的影响

Fig. 17 Influence of height-span ratios on lateral bending moments per unit length of box girders

下,各角点横向弯矩的关系为: $M_B > M_C > M_D > M_A$ 。

### 3.2.3 悬臂板宽度

在截面其他参数不变的情况下,将悬臂板宽度从0 m增加至2.50 m,增量为0.25 m。图18为该组合箱梁在悬臂板宽度变化时跨中截面各角点处的横向弯矩计算结果。

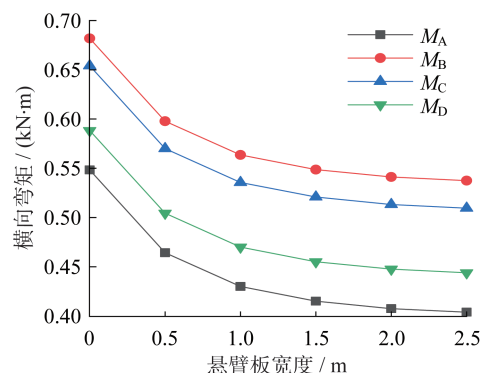


图18 悬臂板宽度对单位长度箱梁横向弯矩的影响

Fig. 18 Influence of cantilever plate widths on lateral bending moments per unit length of box girders

悬臂板宽度的变化不影响等效板厚度的计算,但会影响畸变翘曲系数 $\beta$ 和顶板在自身平面内的抗弯惯性矩 $J_x$ 的取值,进而影响横向弯矩。从图18中可以看出随着悬臂板宽度的增加,组合箱梁横向弯矩总体呈下降趋势。当悬臂板宽度在0~1.5 m之间时,其对降低横向弯矩具有显著效果。相比于悬臂板宽度为0 m时角点C处的横向弯矩,当悬臂板宽度为1.5 m时其值降低为原来的0.80倍。随着悬臂板宽度的进一步增加,各角点处的横向弯矩均有所降低,但变化幅度较小。因此,对于钢桁腹-混凝土组合箱梁,选择合适的悬臂板宽度可以有效降低其横向弯矩。

## 4 结论

(1) 本文结合该类组合箱梁的结构特点和受力特性,根据框架分析法的基本原理,建立了考虑畸变效应的钢桁腹-混凝土组合箱梁横向内力计算公式。本文分析方法可以反映箱梁畸变和横向框架作用对该类组合箱梁横向内力的影响。通过公式解与有限元解的对比可知二者吻合良好,误差均在10%以内,尤其在底板位置处精度更高。

(2) 该类组合箱梁的顶底板对钢桁腹杆有一定的约束作用,钢桁腹杆仍可提供一定的纵向抗弯刚度以承担弯矩。基于这一特性,本文提出了一种新的翘曲应力分布模式,并得到了对应畸变翘曲系数 $\beta$ 的计算公式。根据数值算例可知,本文提出的应力分布模式更加符合该类组合箱梁的受力特点,验证了新应力分布模式的合理性。

(3) 随着荷载偏心距从0.25 m增加至1.50 m,组合箱梁角点A、角点C处的横向弯矩均有所增加,荷载作用位置处的横向弯矩则降低。与混凝土箱梁相比,该类组合箱梁的横向框架作用降低,导致角点A处的横向弯矩变化规律与混凝土箱梁的规律相反。

(4) 随着高跨比的增加,组合箱梁各角点处的横向弯矩逐渐增加,增长规律总体呈曲线分布,当高跨比小于0.07时,横向弯矩的增量相对较大。

(5) 随着悬臂板宽度的增加,组合箱梁各角点的横向弯矩呈下降趋势,当悬臂板宽度从0 m增加至1.5 m时,降低效果最为显著。因此,对于钢桁腹-混凝土组合箱梁,选择合适的悬臂板宽度可以有效降低其横向弯矩。

## 参考文献:

- [1] 张岩,杨霞林,冀伟. 钢桁腹式混凝土组合箱梁翼板纵向应力的计算方法研究[J]. 计算力学学报, 2019, 36(5): 642-649. DOI:10.7511/jslx20180703002.
- ZHANG Yan, YANG Xialin, JI Wei. Research on calculation method of longitudinal stress on flange plate for concrete composite box girder with steel truss webs [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2019, 36(5): 642-649. DOI:10.7511/jslx20180703002. (in Chinese)
- [2] 徐杰. 钢桁腹-混凝土组合梁桥动力特性与冲击系数研究[D]. 南京:东南大学, 2019.
- XU Jie. Study on dynamic characteristics and impact factors of composite bridges with steel truss webs [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [3] TAN Y L, ZHU B, QI L, et al. Mechanical behavior and failure mode of steel-concrete connection joints in a hybrid truss bridge: experimental investigation [J]. Materials, 2020, 13(11): 2549. DOI: 10.3390/ma13112549.
- [4] MACHACEK J, CHARVAT M. Study on shear connection of bridge steel truss and concrete slab deck [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2017, 23(1): 105-112. DOI:10.3846/13923730.2014.976258.
- [5] 杭子豪,刘朵,张建东,等. 钢桁腹-混凝土组合梁桥受弯性能分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(4): 1564-1572, 1861. DOI:10.11776/cjam.37.04.B092.
- HANG Zihao, LIU Duo, ZHANG Jiandong, et al. Analysis of bending behavior of steel truss-concrete composite girder bridge [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(4): 1564-1572, 1861. DOI: 10.11776/cjam.37.04.B092. (in Chinese)
- [6] 杨霞林,于小芹,张元海. 钢桁腹式混凝土组合箱梁的扭转效应分析[J]. 计算力学学报, 2021, 38(2): 230-238. DOI: 10.7511/jslx20200609002.
- YANG Xialin, YU Xiaoqin, ZHANG Yuanhai. Analysis on torsion effect of concrete composite box girder with steel truss webs [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2021, 38(2): 230-238. DOI:10.7511/jslx20200609002. (in Chinese)
- [7] 李永鹏,丁南宏,冀伟. 钢桁腹-混凝土组合箱梁畸变效应分析[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(7): 66-74. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.07.007.
- LI Yongpeng, DING Nanhong, JI Wei. Distortion effect of concrete composite box girder with steel truss webs [J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(7): 66-74. DOI:10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.07.007. (in Chinese)
- [8] 赵品,叶见曙. 波形钢腹板箱梁桥面板横向内力计算的框架分析法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2012, 42(5): 940-944. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2012.05.026.
- ZHAO Pin, YE Jianshu. Frame analysis method of transverse internal force in bridge deck of box girders with corrugated steel webs [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2012, 42(5): 940-944. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2012.05.026. (in Chinese)
- [9] 雷聪. 钢桁腹组合结构梁桥力学性能分析[D]. 南京:东南大学, 2015.
- LEI Cong. Study on mechanical properties of hybrid truss bridges [D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [10] 陈建兵,蒋明利,周晨,等. 钢桁腹混凝土组合梁挠度计算方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 66-72. DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2022.06.10.
- CHEN Jianbing, JIANG Mingli, ZHOU Chen, et al. Calculation method of deflection of steel truss web concrete composite beam [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(6): 66-72. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2022.06.10. (in Chinese)
- [11] KOMATSU S, NISHIMURA N. Three dimensional analysis of truss girders by the thin walled elastic beam theory [J]. Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 1975, 1975(238): 1-16. DOI:10.2208/jscej1969.1975.238\_1.