第42卷第5期
2025年10月
计 算 力 学 学 报
Chinese Journal of Computational Mechanics
Vol. 42, No. 5
October 2025

DOI: 10.7511/jslx20240522001

考虑腹杆剪切变形的简支钢桁腹组合箱梁挠度分析

吕向明*1， 王方旭1,2， 王 鑫1

（1.天水师范大学 土木工程学院，天水 741000；
2.兰州交通大学 土木工程学院，兰州 730070）

摘 要：为研究腹杆剪切变形对钢桁腹组合箱梁挠度的影响，首先将钢桁腹组合箱梁分解为由上下翼板和钢桁架组成的叠层梁，引入腹杆剪切变形转角函数建立钢桁腹组合箱梁在荷载作用下的解析模型，以简支梁为例求解挠曲变形解析解；其次为简便计算组合箱梁跨中挠度，结合初等梁理论及解析解求得截面有效刚度，并利用有效刚度求解跨中挠度；最后分析了组合箱梁在不同荷载工况下的挠曲特性，并与初等梁理论进行对比；在此基础上分析了腹杆直径、腹杆壁厚、腹杆倾角等构造参数对有效刚度的影响。结果表明，腹杆变形对钢桁腹组合箱梁挠度的影响不可忽略，采用初等梁理论计算组合箱梁挠度的最大误差达到了13.61%，考虑腹杆剪切变形得到的解析解计算结果与有限元更接近，最大误差为6.24%；利用截面有效刚度可有效预测跨中挠度，与解析解最大误差为3.64%；构造参数对有效刚度的影响中，腹杆壁厚影响最大，其次是腹杆直径、腹杆倾角；此外，有效刚度与腹杆直径及腹杆壁厚呈正相关，而与腹杆倾角呈负相关。

关键词：组合箱梁，腹杆，剪切变形，挠度分析，有效刚度
中图分类号：U443.3；O302 **文献标志码**：A **文章编号**：1007-4708(2025)05-0839-07

1 引 言

钢桁腹组合箱梁由混凝土翼板、钢桁架及节点组成[1]，钢桁架可有效解决混凝土腹板开裂[2]、减轻结构自重[3]、增加抗风性能[4]；组成钢桁架的钢腹杆拉压交替，在受压腹杆中填充混凝土可提高弯曲[5]和压缩性能[6]，有助于避免受压腹杆的局部屈曲[7]，提升钢桁腹组合箱梁的抗弯刚度[8]；此外钢桁架具有出色的轴向[9]和弯曲强度[10]；利用PBL节点将腹杆与翼板连接可增强两者之间的界面剪切[11]，保证结构整体受力。组合箱梁如图1所示。

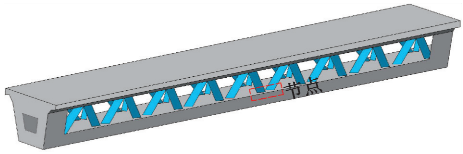

图1 钢桁腹组合箱梁
Fig. 1 Composite box beam with steel truss web

近年来，众学者对钢桁腹组合箱梁的弯曲行为进行了深入研究。Chen等[12]提出反三角钢桁架弯曲刚度最佳。Feng等[13]提出多平面反三角钢桁架的最优设计参数。Huang等[14]研究了界面缺陷的钢桁架的变形行为。Zhou等[15]研究了钢桁架不同位置的变形行为。Huang等[16]提出钢桁架弯矩承载力设计的估算方程。虽然众多学者对钢桁腹组合箱梁变形性能研究已取得丰硕的成果，但腹杆作为不连续的腹板结构，轴向变形会引起箱梁产生竖向剪切附加挠度，现有研究大多采用拟平截面法，因其忽略剪切变形[17]，在特定条件下将低估主梁挠度，设计时安全系数偏低。

本文将钢桁腹组合箱梁的抗弯行为分解为上下翼板之间的桁架抗弯和上下翼板抗弯两者叠加，建立了一个能够考虑腹杆剪切变形的梁理论模型，以简支梁为例推导了组合箱梁在不同荷载类型下的挠曲变形解析解。通过引入有效刚度简化了考虑腹杆剪切变形的组合箱梁跨中挠度计算。在此基础上，分析了腹杆直径、腹杆壁厚和腹杆倾角对

收稿日期：2024-05-22；**修改稿收到日期**：2024-06-20.
基金项目：国家自然科学基金(52068063)；2022年度甘肃省高等学校创新基金(2022A-107)；天水师范学院2023年科研创新平台建设专项(PTJ2023-07)资助项目.
作者简介：吕向明*(1979-)，男，硕士，副教授(E-mail：405243396@qq.com).
引用本文：吕向明，王方旭，王 鑫. 考虑腹杆剪切变形的简支钢桁腹组合箱梁挠度分析[J]. 计算力学学报，2025，**42**(5)：839-845.
LÜ Xiangming, WANG Fangxu, WANG Xin. Analysis of the deflection of simply supported steel truss web composite box beam considering the shear deformation of the steel truss web[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2025, **42**(5): 839-845.

有效刚度折减参数和折减系数的影响。

2 钢桁腹组合箱梁挠度计算模型

2.1 基本假定

钢桁腹组合箱梁挠曲变形时，做如下假定：

(1)假定上下翼板的挠曲位移相同；

(2)上下翼板各自满足平截面假定，忽略剪力滞效应；

(3)材料均为理想弹性；

(4)忽略翼板自身的剪切变形；

(5)假定压杆稳定性满足要求。

2.2 理论计算模型

参见文献[17]，钢桁腹组合箱梁可分解为由上下翼板和钢管桁架组成的叠层梁，将钢桁腹组合箱梁的抗弯行为分解为上下翼板之间的桁架抗弯和上下翼板抗弯两者叠加，如图2所示。

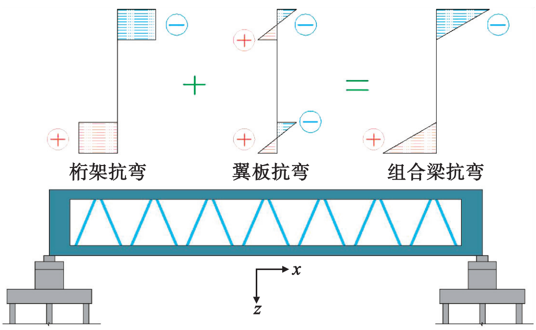

图2 钢桁腹组合箱梁弯曲行为

Fig. 2 Bending behavior of composite box beam with steel truss web

引入直角坐标系$\{o,x,y,z\}$，在竖向荷载作用下，中间层桁架发生剪切变形，顶底板中性轴产生相对转角ϕ，组合箱梁产生竖向挠曲位移w，如图3所示。

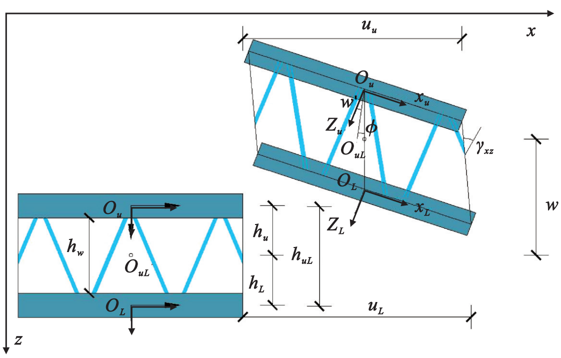

图3 钢桁腹组合箱梁分析模型

Fig. 3 Analysis model of composite box beam with steel truss web

在线弹性范围内，钢桁腹组合梁截面上任意一点的纵向位移由组合梁的纵向位移、上下翼板之间的相对转角引起的相对纵向位移、上下翼板和桁架自身弯曲变形引起的纵向位移叠加，即

$$u_u(x,y,z)=u-h_u\phi-z_u w' \tag{1}$$

$$u_L(x,y,z)=u+h_L\phi-z_L w' \tag{2}$$

式中u为组合箱梁固有的纵向位移，h_u、h_L为组合箱梁截面中性轴分别到上下翼板中性轴的距离，z_u为上翼板上任意一点相对于上翼板中性轴的z向坐标值，z_L为下翼板上任意一点相对于下翼板中性轴的z向坐标值。

在竖向荷载下截面轴力为0，则$u=0$，可得

$$\varepsilon_u=-h_u\phi'-z_u w'',\varepsilon_L=h_L\phi'-z_L w'' \tag{3}$$

式中ε_u为组合箱梁上翼板任意一点的正应变，ε_L为组合箱梁下翼板任意一点的正应变，h_{uL}为上下翼板中性轴之间的距离，h_w为钢管桁架的高度。

梁段微元体模型如图4所示。

$$N_u=-(EA)_u h_u\phi',\quad N_L=(EA)_L h_L\phi' \tag{4}$$

$$M_u=-(EI)_u w'',\quad M_L=-(EI)_L w'' \tag{5}$$

式中N_u、N_L为上下翼板所受轴力，$(EA)_u$、$(EA)_L$为上下翼板轴向刚度，M_u、M_L为上下翼板所受弯矩，$(EI)_u$、$(EI)_L$为上下翼板抗弯刚度。

组合箱梁承受横向荷载作用时，截面轴力为

$$N=N_u+N_L=0 \tag{6}$$

由式(6)可得

$$N_u=-N_L,(EA)_u h_u=(EA)_L h_L \tag{7}$$

组合箱梁截面弯矩为

$$M=M_b+M_t \tag{8}$$

$$M_b=M_u+M_L \tag{9}$$

$$M_t=-N_u h_u+N_L h_L \tag{10}$$

式中M为组合箱梁截面总弯矩，M_b为上下翼板弯曲作用提供的总抵抗弯矩，M_t为上下翼板桁架作用提供的抵抗弯矩。

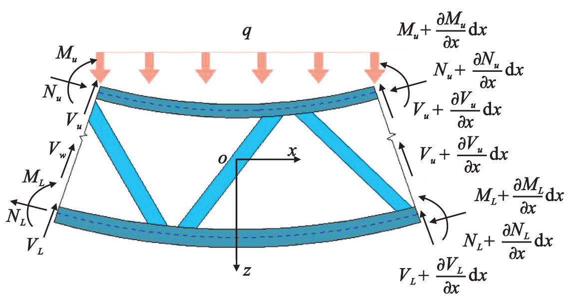

图4 组合箱梁梁段微元体模型

Fig. 4 Microelement model of composite box beam segment

根据材料力学知识，截面剪力可表示为

$$V=M'=M_b'+M_t'=V_b+V_t \tag{11}$$

$$M_b'=-[(EI)_u+(EI)_L]w'''=V_b \tag{12}$$

$$M_t'=[(EA)_u h_u^2+(EA)_L h_L^2]\phi''=V_t \tag{13}$$

由图4可得

$$V=V_u+V_L+V_w=V_b+V_w \tag{14}$$

式中 V_w 为腹杆提供的截面剪力。

整理式(11～14),可得到组合箱梁内力平衡控制微分方程为

$$B_1\phi''-C(w'+\phi)=0 \tag{15}$$

$$B_2w^{(3)}-C(w'+\phi)=V \tag{16}$$

$$B_1=(EA)_uh_u^2+(EA)_Lh_L^2 \tag{17}$$

$$B_2=(EI)_u+(EI)_L \tag{18}$$

$$C=\frac{V_w}{w'+\phi} \tag{19}$$

式中 B_1 为桁架提供的抗弯刚度,B_2 为翼板提供的抗弯刚度,C 为中间层桁架的有效抗剪刚度。

钢桁腹组合截面,V_w 常见计算方法为求解腹杆轴力的竖向分量或根据剪切变形相等将腹杆换算为钢腹板,通过剪应变求解。本文考虑剪切变形,且微分运算需截面连续,故采用等效换算。

2.3　腹杆等效换算

如图5所示,基于剪切变形相等原则将不连续的钢腹杆换算为钢腹板。假设斜腹杆长为 l_1,其竖向高度与水平投影长度分别为 h_3 和 b_3,钢桁腹杆竖向夹角为 β。

钢桁腹杆在剪力 V_V 的作用下,假设节点 X_2 相对于节点 X_1 的位移为 η_1 为

$$\eta_1=\frac{\Delta l_1}{\cos\beta}=\frac{Vl_1}{E_SA_o\cos^2\beta}=\frac{Vl_1^3}{E_SA_oh_3^2} \tag{20}$$

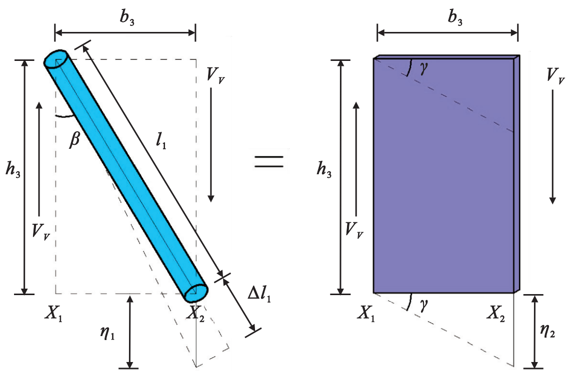

图5　腹杆等效换算

Fig. 5　Equivalent conversion of steel truss web members

等效钢腹板在 V_V 作用下,η_2 为

$$\eta_2=b_3\gamma=\frac{b_3V_V}{G_sA_w}=\frac{b_3V_V}{G_sh_3t_w} \tag{21}$$

式中 G_s 为钢材剪切模量,A_w 为等效钢腹板的横截面积,$A_w=h_3t_w$,t_w 为等效钢腹板的厚度。

根据剪切变形相等原则,可得等效钢腹板厚度的计算公式为

$$t_w=\frac{E_sb_3h_3A_0}{G_sl_1^3}=\frac{2(1+\mu_s)b_3h_3A_0}{l_1^3} \tag{22}$$

式中 μ_s 为钢材的泊松比。

腹杆的等效剪应变 γ_w 为

$$\gamma_w=\frac{h_{uL}}{h_w}(w'+\phi) \tag{23}$$

腹杆提供的剪力及有效抗剪刚度为

$$V_w=G_sA_w\gamma_w=G_sA_w\frac{h_{uL}}{h_w}(w'+\phi) \tag{24}$$

$$C=G_sA_w\frac{h_{uL}}{h_w}=G_st_wh_{uL} \tag{25}$$

结合式(15,19),便可进行后续计算。

3　简支钢桁腹组合箱梁变形解析解

简支钢桁腹组合箱梁跨度为 L,满跨作用均布荷载 q,如图6所示。

弯矩和剪力为

$$M(x)=\frac{q}{2}(L-x)x,\quad Q(x)=\frac{q}{2}(L-2x) \tag{26}$$

边界条件为

$$\begin{cases}w(0)=0\\ w(L)=0\end{cases},\begin{cases}w''(0)=0\\ w''(L)=0\end{cases},\begin{cases}\phi'(0)=0\\ \phi'(L)=0\end{cases} \tag{27}$$

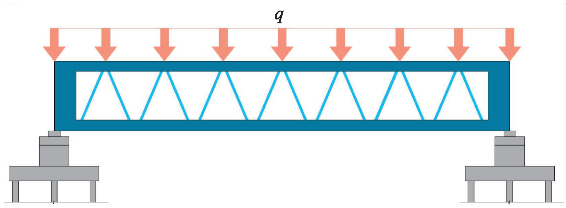

图6　简支钢桁腹组合箱梁承受均布荷载

Fig. 6　Uniform load on composite box beamwith simply supported steel truss web

通过顶底板中性轴产生相对转角 ϕ,引入中间层桁架发生的剪切变形,联立式(19,20)可得

$$\phi^{(4)}-A_1\phi''=A_2Q(x) \tag{28}$$

解方程(28)可得

$$\phi(x)=\frac{C_1\sinh(rx)}{r_1^2}+\frac{C_2\cosh(rx)}{r_1^2}+C_3x+C_4-\frac{A_2qLx^2}{4A_1}+\frac{A_2qx^3}{6A_1} \tag{29}$$

将式(29)代入式(15),可得解析解为

$$w(x)=\left(\frac{B_1}{Cr}-\frac{1}{r^3}\right)(C_1\cosh(rx)+C_2\sinh(rx))+\frac{CA_2qx^3\left(L-\frac{x}{2}\right)-6B_1A_2qx(L-x)}{12CA_1}-\frac{1}{2}C_3x^2-C_4x+C_5 \tag{30}$$

式中

$$A_1=\frac{(B_1+B_2)C}{B_1B_2},\quad A_2=-\frac{C}{B_1B_2},\quad r=\sqrt{A_1} \tag{31}$$

利用边界条件式(27),可求得 $C_1 \sim C_5$ 为

$$C_1=-\frac{q}{r(B_1+B_2)},\quad C_2=-\frac{q}{r(B_1+B_2)}\tanh\left(\frac{rL}{2}\right) \tag{32}$$

$$C_3=-\frac{q}{r^2(B_1+B_2)},\quad C_4=-\frac{1}{24}\frac{(r^2L^2-12)Lq}{r^2(B_1+B_2)} \tag{33}$$

$$C_5=-\frac{q(B_1r^2-C)}{Cr^2(B_1+B_2)} \tag{34}$$

将 $C_1 \sim C_5$ 代入式(30)可得跨中挠度为

$$w_{\frac{L}{2}}=\frac{5qL^4}{384(B_1+B_2)}+\frac{B_1^3B_2q}{(B_1+B_2)^3C^2\cosh\left(\frac{rL}{2}\right)}+\frac{q[48CL^2B_1^2(B_1+B_2)-384B_1^3B_2]}{384(B_1+B_2)^3C^2} \tag{35}$$

同理可得简支钢桁腹组合箱跨中集中荷载为 P 时,

$$w(x)=\left(\frac{B_1}{Cr}-\frac{1}{r^3}\right)(C_1e^{rx}-C_2e^{-rx})-\frac{1}{2}C_3x^2+\frac{B_1A_2Px}{2CA_1}-\frac{A_2Px^3}{12A_1}-C_4x+C_5 \tag{36}$$

$$w_{\frac{L}{2}}=\frac{PL^3}{48(B_1+B_2)}+\frac{L\left(\frac{B_1}{C}-\frac{1}{r^2}\right)}{4(B_1+B_2)}+\frac{P(24C-24r^2B_1)\sinh\left(\frac{rL}{2}\right)}{48(B_1+B_2)Cr^3\cosh\left(\frac{rL}{2}\right)} \tag{37}$$

4 截面有效刚度及跨中挠度简化计算

参考材料力学可得,忽略剪切变形时,简支梁在均布荷载和跨中集中荷载下的跨中挠度为

$$w_{\frac{L}{2}}=\frac{5qL^4}{384B},\quad w_{\frac{L}{2}}=\frac{PL^3}{48B} \tag{38}$$

$$B=B_1+B_2 \tag{39}$$

式中 B 为采用拟平截面法计算得到的组合梁截面刚度。

由于简支梁跨中挠度为工程设计中重点控制指标,而式(35,37)过于复杂,故参见文献[17]结合式(38),对式(35,37)进行有效简化,将采用拟平截面法得到的组合梁截面刚度 B 利用考虑腹杆剪切变形得到的截面有效刚度 B_z 代替,即得

$$B_z=\lambda B_1+B_2,\quad \lambda=\frac{\zeta}{\zeta+10} \tag{40}$$

$$\zeta=\frac{2(1+\mu_s)b_3h_3A_0G_sh_{uL}L^2}{[(EA)_uh_u^2+(EA)_Lh_L^2]l_1^3} \tag{41}$$

式中 λ 为有效刚度折减系数,ζ 为有效刚度折减参数。

5 算例分析

5.1 工程背景

选取某工程实例为背景,主梁为单箱单室,跨径 35 m,顶板宽 8.5 m,底板宽 4.8 m,梁高2.3 m,混凝土 C50,钢桁腹杆 Q345C 级钢管,规格 $\phi351\times16$,水平倾角为 67°,节间距为 1.95 m,横截面如图 7 所示。

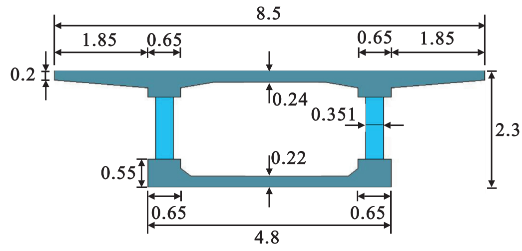

图 7 组合箱梁(单位:m)

Fig. 7 Composite box beam(unit:m)

5.2 有限元模型

采用 ANSYS 建立三维有限元分析模型,钢腹杆均为空心,选用 SOLID187 单元模拟,未考虑受压腹杆中填充混凝土的影响,顶板、底板选用 SOLID185 单元模拟,各组件的连接采用节点自由度耦合,混凝土弹性模量 $E_c=3.45\times10^4$ MPa,泊松比 $\mu_c=0.2$,钢材弹性模量 $E_s=2.06\times10^5$ MPa,泊松比 $\mu_s=0.3$,有限元模型如图 8 所示。

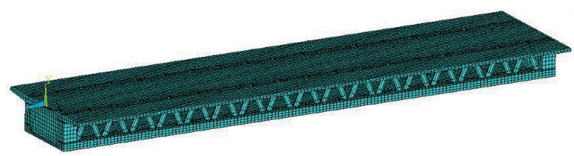

图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

5.3 结果分析

5.3.1 挠曲变形解析解

选取简支梁受均布荷载(工况 I)、集中荷载(工况Ⅱ)。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015),按公路-I 级车道荷载取值,均布荷载 $q=10.5$ kN/m,集中荷载 $P=300$ kN。以本文解析解与 Euler 梁及 ANSYS 计算结果作对比,其中 ANSYS 结果取其顶板几何中心处。对比结果如图 9 和图 10 所示。

由图 9 和图 10 可知,采用 Euler 梁理论将低估主梁挠度,均布荷载时误差为 11.01%,集中荷载时误差为 13.61%;本文解析解计算结果更接近实际状态,承受均布荷载时的跨中误差为 6.05%,承受集中荷载时的跨中误差为 6.24%,从而验证了本文方法的正确性。

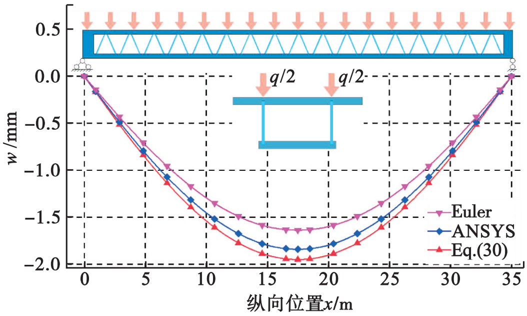

图 9　工况Ⅰ荷载-挠度曲线

Fig. 9　Load-deflection curve in condition Ⅰ

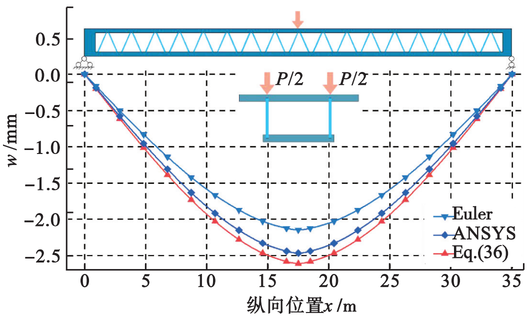

图 10　工况Ⅱ荷载-挠度曲线

Fig. 10　Load-deflection curve in condition Ⅱ

5.3.2　截面有效刚度

选取不同工况下解析解及按截面有效刚度计算的跨中挠度与有限元进行对比,计算百分比时以有限元结果为参考,百分比差值表示为 ρ,结果列入表 1。

表 1　跨中挠度对比

Tab. 1　Comparison of mid-span deflection

荷载	w_i/ρ	计算方法			
		Euler	ANSYS	Eq. (38)/(50)	Eq. (63)/(64)
均布	w_i/mm	−1.633	−1.835	−1.946	−2.012
	ρ/%	11.01	—	6.05	9.65
集中	w_i/mm	−2.133	−2.469	−2.623	−2.713
	ρ/%	13.61	—	6.24	9.88

由表 1 可知,采用简化的截面有效刚度计算的跨中挠度与有限元最大误差为 9.88%,组合箱梁在承受均布荷载时的跨中误差为 3.6%,承受集中荷载时的跨中误差为 3.64%;由此说明跨中挠度计算时可采用截面有效刚度简化处理。

5.4　参数分析

采用截面有效刚度计算钢桁腹组合箱梁变形时,与 λ 及 ζ 相关的 t_w 采用等效换算,现取与 t_w 相关的腹杆直径、腹杆壁厚及腹杆倾角 3 个参数进行分析,研究各参数对 λ 及 ζ 的影响,各参数均取 5 个变化值,列入表 2,各参数影响结果如图 11～图 13 所示。

表 2　腹杆参数取值

Tab. 2　Parameter value of steel truss web

参数变化	直径/mm	壁厚/mm	倾角/(°)
Ⅰ	331	14	60.10
Ⅱ	341	16	64.34
Ⅲ	351	18	67.00
Ⅳ	361	20	69.24
Ⅴ	371	22	71.07

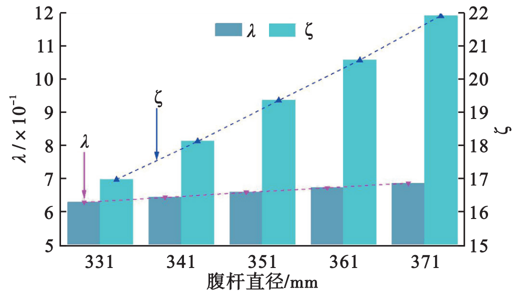

图 11　腹杆直径变化对 λ 及 ζ 的影响

Fig. 11　Influence of change of diameter of steel truss web on λ and ζ

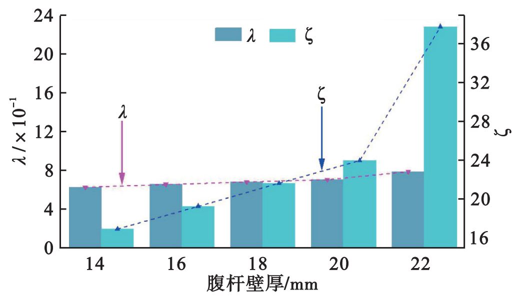

图 12　腹杆壁厚变化对 λ 及 ζ 的影响

Fig. 12　Influence of change of wall thicknesses of steel truss web on λ and ζ

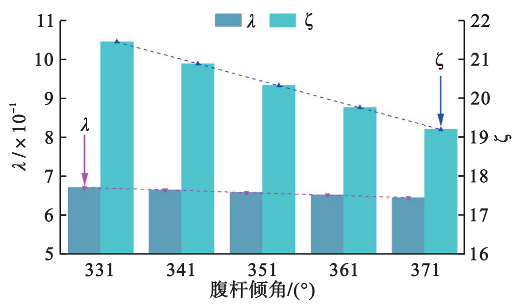

图 13　腹杆倾角变化对 λ 及 ζ 的影响

Fig. 13　Influence of change of angle of steel truss web on λ and ζ

由图 11～图 13 可知,λ 及 ζ 随着腹杆直径及腹杆壁厚的增加而增加,随着腹杆倾角的增加而减小;由此说明 λ 及 ζ 与腹杆直径及腹杆壁厚正相关,而与腹杆倾角负相关。

为综合衡量不同参数对 λ 及 ζ 的影响,选取相对增量比来区分各影响因素的显著性,令显著性为

$$\Psi = \Delta k_{\max} / \Delta p_{\max} \tag{42}$$

式中 $\Delta p_{\max}$ 为不同参数百分比最大差值,$\Delta k_{\max}$ 为对应参数指标变化百分比。

腹杆直径、腹杆壁厚及腹杆倾角的显著性指标列入表 3。由表 3 可知,腹杆壁厚对 λ 及 ζ 的影响最大,其次为腹杆直径、腹杆倾角。

表 3 显著性指标

Tab. 3 Significance index

	腹杆直径	腹杆壁厚	腹杆倾角
λ	0.499	4.546	0.320
ζ	1.592	21.726	0.975

6 结 论

(1)腹杆变形对钢桁腹组合箱梁挠度的影响不可忽略,与有限元相比,采用初等梁理论计算时组合箱梁在承受均布荷载时的跨中误差为 11.01%,承受集中荷载时的跨中误差为 13.61%,考虑腹杆剪切变形得到的解析解计算结果更接近实际状态,承受均布荷载时的跨中误差为 6.05%,承受集中荷载时的跨中误差为 6.24%;

(2)利用解析解结合初等梁理论求得截面有效刚度可简化跨中挠度计算,与解析解相比,组合箱梁在承受均布荷载时的跨中误差为 3.6%,承受集中荷载时的跨中误差为 3.64%;

(3)影响有效刚度的构造参数中,腹杆壁厚影响最大,其次是腹杆直径、腹杆倾角;此外,有效刚度与腹杆直径及腹杆壁厚呈正相关,而与腹杆倾角呈负相关。

参考文献(References):

[1] Jung K H, Kim J J, Yi J W, et al. Development and evaluation of new connection systems for hybrid truss bridges[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2013, **11**(2): 61-79.

[2] Tian Z J, Liu Y J, Jiang i, et al. A review on application of composite truss bridges composed of hollow structural section members[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering* (*English Edition*), 2019, **6**(1): 94-108.

[3] 李嘉旺,李威. 水下掩埋物目标强度仿真分析[J]. 海洋工程装备与技术, 2020, **7**(2): 114-119. (LI Jiawang, LI Wei. Numerical Simulation and analysis of target strength of underwater buried objects[J]. *Ocean Engineering Equipment and Technology*, 2020, **7**(2): 114-119. (in Chinese))

[4] Chen S L, Zhang H, Hou C, et al. Reliability calibration for the design of multiple-chord CFST trusses by advanced analysis[J]. *Structural Safety*, 2021, **89**: 102051.

[5] Chen Y Y, Dong J C, Xu T H. Composite box beam with corrugated steel webs and trusses—A new type of bridge structure[J]. *Engineering Structures*, 2018, **166**: 354-362.

[6] 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.

[7] Hu B, Wang J F. Experimental investigation and analysis on flexural behavior of CFSTTC beams[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, **116**: 277-290.

[8] Fong M, Chan S L, Uy B. Advanced design for trusses of steel and concrete-filled tubular sections[J]. *Engineering Structures*, 2011, **33**(12): 3162-3171.

[10] Huang W J, Fenu L, Chen B C, et al. Experimental study on joint resistance and failure modes of concrete filled steel tubular (CFST) truss girders[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, **141**: 241-250.

[11] Hu B, Che R Y, Wang J F, et al. Analytical investigation into the flexural behavior of steel tubular truss-and-concrete (STTC) composite beams[J]. *Structures*, 2023, **50**: 670-688.

[12] Chen Y, Feng R, Gao S W. Experimental study of concrete-filled multiplanar circular hollow section tubular trusses[J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, **94**: 199-213.

[13] Feng R, Chen Y, Gao S W, et al. Numerical investigation of concrete-filled multi-planar CHS Inverse-Triangular tubular truss[J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, **94**: 23-37.

[14] Huang Y H, Liu A R, Fu J Y, et al. Experimental investigation of the flexural behavior of CFST trusses with interfacial imperfection[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, **137**: 52-65.

[15] Zhou W B, Chen Y, Wang K, et al. Experimental research on circular concrete filled stainless steel tubular truss[J]. *Thin-Walled Structures*, 2017, **117**: 224-238.

[16] Huang W J, Lai Z C, Chen B C, et al. Concrete-filled steel tube (CFT) truss girders: Experimental tests, analysis, and design[J]. *Engineering Structures*, 2018, **156**: 118-129.

[17] 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))

Analysis of the deflection of simply supported steel truss web composite box beam considering the shear deformation of the steel truss web

LÜ Xiangming*[1], WANG Fangxu[1,2], WANG Xin[1]

(1. School of Civil Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To study the influence of steel truss web shear deformation on the deflection of steel truss web composite box beams, the beams were first decomposed into a laminated structure composed of top and bottom flanges and a steel truss. A steel truss web shear deformation angle function was introduced to establish an analytical model, and the flexural deformation of a simply supported beam was analyzed as an example. The effective stiffness of the cross-section was determined by combining Euler beam theory and the analytical solution, and the mid-span deflection was calculated using this effective stiffness. The flexural characteristics under different load conditions were analyzed and compared with the Euler beam theory. The influence of structural parameters such as steel truss web diameter, steel truss web wall thickness, and steel truss web inclination angle on the effective stiffness was also examined. The results show that considering steel truss web shear deformation provides an analytical solution closer to the finite element results, with a maximum error of 6.24%. Using the effective stiffness can effectively predict the mid-span deflection, with a maximum error of 3.64% compared with the analytical solution. Among the structural parameters affecting the effective stiffness, steel truss web wall thickness has the greatest influence, followed by steel truss web diameter and steel truss web inclination angle. Additionally, the effective stiffness is positively correlated with steel truss web diameter and steel truss wall thickness but negatively correlated with steel truss web inclination angle.

Key words: composite box beam; steel truss web; shear deformation; deformation calculation; effective stiffness