

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2025.02.015

薄壁箱梁几何特性对剪力滞效应的影响

梁永永, 张元海*

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:【目标】为便于分析薄壁箱梁的剪力滞效应, 提出一种能够直观反映箱形梁剪力滞效应的几何特性参数。【方法】选取剪力滞附加挠度作为广义位移, 应用能量变分法建立控制微分方程并给出初参数解, 推导出简支及悬臂箱梁作用竖向集中荷载和竖向均布荷载时截面剪力滞广义力矩的计算公式。结合已有文献中的数值算例, 将求得的正应力与有限元软件 ANSYS 应力结果进行比较并详细分析了几何特性 k 对剪力滞效应的影响以及截面尺寸变化对参数 k 的影响规律。【结果】解析理论计算结果与 ANSYS 结果吻合良好; 简支箱梁剪力滞广义力矩在竖向集中荷载作用截面出现峰值, 而后向简支两端迅速衰减, 只发生在荷载作用截面附近区域; 剪力滞广义力矩随几何特性 k 的增大而减小, 其中靠近外荷载作用截面的梁段区域以较快的速度衰减, 衰减幅度随 k 值的增加缓慢降低; 随着悬臂板相对宽度比逐渐增大, 几何特性 k 呈先减小后增大再减小的变化趋势, 相对宽度等于0.5时参数 k 出现最大值; 几何特性 k 随顶板厚度的增大而增大, 随梁高、腹板和底板厚度的增大而减小。选择壁厚较大的顶板与壁厚较小的腹板有助于减小箱梁的剪力滞效应。

关键词: 桥梁工程; 剪力滞效应; 能量变分法; 薄壁箱梁; 几何特性参数

中图分类号: U448.21+3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2025) 02-0131-06

Influence of thin-walled box girder geometric characteristics on shear lag effect

LIANG Yongyong, ZHANG Yuanhai*

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

Abstract: [Objective] To analyze the shear lag effect of thin-walled box girders, the geometric characteristic parameter was proposed, which could intuitively reflect the shear lag effect of box girders. [Method] The additional deflection due to shear lag was selected as the generalized displacement. The control differential equation was established by using the energy variation method. An initial parameter solution was provided. The calculation formulas for generalized shear lag moment of cross-sections were derived under vertical concentrated loads and vertical uniform distributed loads for simply-supported and cantilever box girders. By combining the numerical examples from existing literatures, the calculated normal stress was compared with the stress result with finite element software ANSYS. The detailed analysis was conducted on the influence of parameter k on shear lag effect, as well as the influence of cross-section dimension variation on parameter k . [Result] The theoretical analytical result is in good agreement with the ANSYS result. The generalized shear lag moment of simply-supported box girder exhibits a peak at the section under vertical

收稿日期: 2022-06-10 修改日期: 2024-09-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51968040)

作者简介: 梁永永 (1996-), 男, 甘肃庆阳人, 硕士, 研究方向为薄壁箱梁设计理论。 (1978591701@qq.com)

* 通讯作者: 张元海 (1965-), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 研究方向为薄壁箱梁设计理论。 (zyh17012@163.com)

引用格式: 梁永永, 张元海. 薄壁箱梁几何特性对剪力滞效应的影响 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (2): 131-136. LIANG Yongyong, ZHANG Yuanhai. Influence of thin-walled box girder geometric characteristics on shear lag effect [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42 (2): 131-136.

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

concentrated load. Then the backward simply-supported ends decay rapidly. The effect occurs only at the region near the loaded section. The generalized shear lag moment decreases with the increase of geometric characteristic k . The girder segment near the external load application section decays more rapidly. The decay amplitude decreases slowly with the increase of k value. As the relative width ratio of cantilever slab increases gradually, the geometric characteristic k first decreases, then increases, and finally decreases again. When the relative width is 0.5, the parameter k reaches its maximum value. The geometric characteristic k increases with the increase of top slab thickness, but decreases with the increase of beam height, web thickness, and bottom plate thickness. Choosing the top slab with larger thickness and the web with smaller thickness helps to reduce the shear lag effect of box girders.

Key words: bridge engineering; shear lag effect; energy variation method; thin-walled box girder; geometric characteristic parameter

0 引言

薄壁箱梁因其良好的受力性能被广泛应用于桥梁工程。由于弯曲时翼缘板面内的剪切变形不均匀,箱梁往往产生剪力滞效应,工程设计中必须对其予以充分考虑。近年来,国内外学者针对箱梁的剪力滞效应进行了许多研究工作^[1-10]。刘旭政等^[11]通过建立有限元模型研究了三跨变截面波形钢腹板组合箱梁桥的剪力滞效应,引入了有效分布宽度修正系数并计算分析了该系数在不同梁段区间的取值。周朋等^[12]应用有限梁段法分析了不同荷载工况作用下变截面连续箱梁桥其控制截面的正应力及剪力滞系数。Gyani 等^[13]通过定义新的截面纵向位移函数,开发出一种适用于悬臂箱梁剪力滞效应的简化分析理论。李夏元等^[14]在铁木辛柯梁理论的基础上,通过考虑腹板剪切变形、轴向自平衡等条件,修正了薄壁箱梁横截面翘曲位移函数,结果表明,剪切变形对箱形梁的挠曲有较大影响。张元海等^[15-16]选取翼缘板剪切变形引起的附加挠度作为广义位移,在定义新型广义力矩以及引入翘曲位移修正系数的基础上,基于最小势能原理建立了控制微分方程并给出初参数解,将剪力滞效应从箱梁弯曲中分离出来单独进行分析。Luo 等^[17]以双室箱梁作为研究对象,利用余弦函数描述了翼缘板的剪力滞翘曲位移模式并建立了考虑剪力滞效应的控制微分方程。秦翱翔等^[18]运用能量变分法建立控制微分方程,对比分析了在设置二次抛物线和余弦函数两种不同类型的翘曲位移函数情况下单箱双室组合箱梁的剪力滞效应。研究结果表明,翘曲位移模式为二次抛物线的剪力滞解析理论适用于集中荷载作用,翘曲位移模式为余弦函数的解析解在均布荷载作用下与实测值和有限元值更为接近。

上述报道的分析箱梁剪力滞效应的文献虽然在结果上能取得较高精度,但其求解过程繁琐,不利于工程技术人员理解。本研究针对单箱单室薄壁箱梁,选取剪力滞附加挠度作为广义位移,得到一种可以反映剪力滞效应的几何特性 k , 并给出竖向荷载作用下箱梁截面剪力滞广义力矩的计算公式;通过求解简支和悬臂箱梁数值算例,详细分析参数 k 对剪力滞效应的影响规律。

1 剪力滞翘曲位移

薄壁箱梁横截面如图 1 所示。 xoy 为正交直角坐标系,其中 o 为截面形心, x 轴和 y 轴分别为过形心 o 的水平轴及竖向轴, z 轴垂直 xy 轴向外; a 、 b 、 c 分别为箱梁底板、顶板及悬臂板的宽度; h 为梁高; t_b 、 t_u 、 t_w 分别为箱室底板、顶板和悬臂板、腹板的厚度。

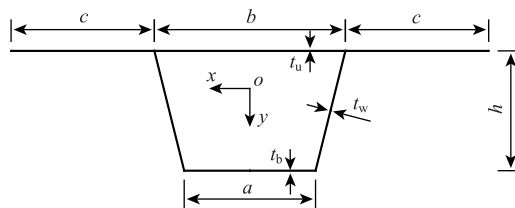


图 1 箱梁横截面简图

Fig. 1 Cross-section of box girder

箱梁在受到竖向对称荷载作用时,由于剪力滞效应造成的截面纵向翘曲位移为:

$$u_{\omega}(x, y, z) = -\omega(x, y)f'(z), \quad (1)$$

式中, $\omega(x, y) = y - \eta\omega_{\zeta}(x, y)$ 为剪力滞广义翘曲位移函数,其中 η 为应力自平衡修正系数, $\omega_{\zeta}(x, y)$ 为剪力滞翘曲位移函数; $f(z)$ 为剪力滞效应造成的附加挠度。

则截面的翘曲正应力为:

$$\sigma_{\omega} = -E\omega f'', \quad (2)$$

式中 E 为弹性模量。

定义剪力滞广义力矩为:

$$M_{\omega} = \int_A \sigma_{\omega} \omega dA = -EI_{\omega} f'', \quad (3)$$

式中 $I_{\omega} = \int_A \omega^2 dA$ 为剪力滞广义翘曲惯性矩。

则翘曲正应力又可表示为:

$$\sigma_{\omega} = \frac{M_{\omega}}{I_{\omega}} \omega. \quad (4)$$

2 控制微分方程及初参数解

当箱梁受沿 z 轴的竖向分布荷载 p 作用时, 得到其总势能 Π 的表达式如式 (5) 所示。

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \left(\frac{\sigma^2}{E} + \frac{\tau^2}{G} \right) dV - \int_l p(w+f) dz = \frac{1}{2} \int_0^l (EI_x w''^2 + EI_{\omega} f''^2 + \eta^2 GA_{\zeta} f'^2) dz - \int_0^l p(w+f) dz, \quad (5)$$

式中, σ 和 τ 分别为截面总的正应力和剪应力; w 为初等梁的挠度; G 为剪切模量; I_x 为横截面对 x 轴的惯性矩; $A_{\zeta} = \int_A (\partial \omega_{\zeta} / \partial x)^2 dA$ 。

根据最小势能原理, 总势能的一阶变分为 0, 也即

$$\delta \Pi = \int_0^l (EI_x w'''' - p) \delta w dz + \int_0^l (EI_{\omega} f'''' - \eta^2 GA_{\zeta} f'' - p) \delta f dz + EI_x w'' \delta w' \big|_0^l - EI_x w''' \delta w \big|_0^l + EI_{\omega} f'' \delta f' \big|_0^l + (\eta^2 GA_{\zeta} f' - EI_{\omega} f''') \delta f \big|_0^l = 0. \quad (6)$$

由式 (6) 可建立关于剪力滞附加挠度 f 的控制微分方程如下:

$$f'''' - k^2 f'' = \frac{p}{EI_{\omega}}, \quad (7)$$

式中 $k = \eta \sqrt{GA_{\zeta} / EI_{\omega}}$ 。

先不考虑外荷载作用, 则可将箱梁截面的附加挠度 f 、广义位移 f' 、广义力矩 M_{ω} 、广义剪力 Q_{ω} 用初参数表达, 其中 $Q_{\omega} = \eta^2 GA_{\zeta} f' - EI_{\omega} f'''$ 。当 $z=0$ 时, 箱梁起始端的初参数为 $f_0, f'_0, M_{\omega 0}$ 及 $Q_{\omega 0}$, 解得任意截面的状态向量为:

$$\{z\} = \left\{ f \quad f' \quad \frac{M_{\omega}}{EI_{\omega}} \quad \frac{Q_{\omega}}{EI_{\omega}} \right\}^T = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{k} \sinh kz & \frac{1}{k^2} (1 - \cosh kz) & \frac{1}{k^3} (kz - \sinh kz) \\ 0 & \cosh kz & -\frac{1}{k} \sinh kz & \frac{1}{k^2} (1 - \cosh kz) \\ 0 & -k \sinh kz & \cosh kz & \frac{1}{k} \sinh kz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{Bmatrix} f_0 \\ f'_0 \\ \frac{M_{\omega 0}}{EI_{\omega}} \\ \frac{Q_{\omega 0}}{EI_{\omega}} \end{Bmatrix}. \quad (8)$$

确定各初参数的边界约束条件为:

(1) 自由端: 箱形梁在自由端处广义力矩和广义剪力为 0, 即:

$$M_{\omega} = 0, Q_{\omega} = 0.$$

(2) 简支端: 箱形梁在梁端不产生附加挠度, 但可以翘曲, 即:

$$f = 0, M_{\omega} = 0.$$

(3) 固定端: 箱形梁在梁端不产生附加挠度和附加翘曲转角, 即:

$$f = 0, f' = 0.$$

3 箱梁作用外荷载时的广义力矩

3.1 简支箱梁

跨中集中荷载:

当 $0 \leq z \leq l/2$ 时,

$$M_{\omega} = \frac{P}{2k} \frac{\sinh kz}{\cosh kl/2}; \quad (9)$$

当 $l/2 < z \leq l$ 时,

$$M_{\omega} = \frac{P}{2k} \frac{\sinh kz}{\cosh kl/2} - \frac{P}{k} \sinh \left(z - \frac{l}{2} \right). \quad (10)$$

满跨均布荷载:

$$M_{\omega} = \frac{q}{k^2} \left(1 - \cosh kz + \tanh \frac{kl}{2} \sinh kz \right), \quad (11)$$

式中 l 为跨度。

3.2 悬臂箱梁

自由端集中荷载:

$$M_{\omega} = \frac{P}{k} (\sinh kz + \tanh kl \cosh kz). \quad (12)$$

满跨均布荷载:

$$M_{\omega} = \frac{q}{k^2} \left(1 - \frac{\cosh kz}{\cosh kl} \right) + \frac{ql}{k} (\sinh kz - \tanh kl \cosh kz). \quad (13)$$

当计算的箱梁截面位置确定后, 剪力滞广义力矩只与几何特性参数 k 有关, k 综合反映薄壁箱梁剪力滞效应, 求得其量纲为 m^{-1} 。通过对 k 进行计算分析, 可在不求解剪力滞控制微分方程初参数解的情况下研究截面几何尺寸对薄壁箱梁剪力滞效应的影响。

4 数值算例

引用文献[15]中的算例,如图2所示,一跨长为50 m的斜腹板混凝土简支箱梁受到两种工况作用,各工况布置分别为:(1)跨中腹板顶面布置 2×10 kN的对称竖向集中荷载;(2)腹板顶面布置 2×2 kN/m的满跨对称均布荷载。箱梁弹性模量和泊松比分别为31 GPa和1/6。根据薄壁箱梁剪力滞几何特性计算公式,求得截面惯性矩 $I_x = 5.280 \text{ m}^4$,剪力滞翘曲惯性矩 $I_\omega = 3.479 \text{ m}^4$,参数 $k = 0.830 \text{ m}^{-1}$ 。

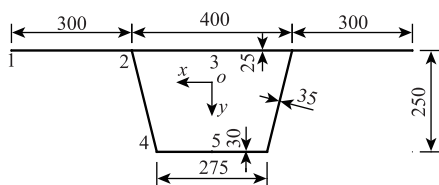


图2 简支箱梁跨中横截面尺寸(单位:cm)

Fig. 2 Dimensions of mid-span cross-section of simply-supported box girder (unit: cm)

按本研究建立的计算公式求得不同工况作用下薄壁箱梁截面剪力滞广义力矩沿 z 轴的分布如图3所示。从图中可以看出,简支箱梁受不同形式的竖向荷载作用时截面剪力滞广义力矩的分布有较大区别。在均布荷载作用下,剪力滞广义力矩在支座处迅速变化,其余梁跨位置呈水平直线分布。在集中荷载作用下,剪力滞广义力矩在跨中截面出现峰值,而后向简支两端迅速衰减,远离外荷载作用处近似为0,即剪力滞广义力矩只发生在外荷载作用截面附近区域。

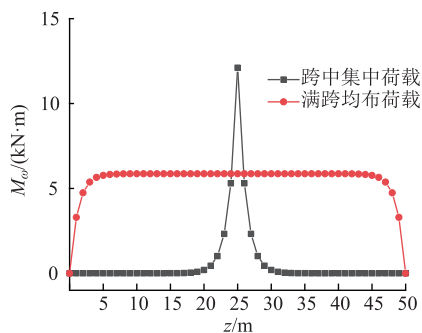


图3 剪力滞广义力矩分布曲线

Fig. 3 Distribution curve of generalized shear lag moment

为验证本研究剪力滞解析理论的正确性,应用通用有限元软件ANSYS中的SHELL181壳单元建立有限元模型,计算该算例中箱梁在工况(1)作用下横截面的正应力,并与本研究解析理论计算结果作对比。有限元施加约束时简支梁端约束底排节点,其中一端约束 U_x , U_y 和 U_z ,另一端约束 U_x 和 U_y 。有限元划

分网格时,划分的单元越小,计算结果越精确,本算例将全梁划分为6 000个单元,总计6 060个节点。计算截面选至薄壁箱梁跨中,竖向对称集中荷载施加在腹板顶面节点,横截面正应力的计算位置选择在图2所示的各关键点上,计算结果见表1。由表可知,本研究计算结果与ANSYS模拟结果总体上吻合良好。

表1 正应力计算结果对比

Table 1 Comparison of normal stress calculation results

计算点	σ_ω/kPa	σ_b/kPa	σ/kPa	ANSYS/kPa
1	5.402	-39.856	-34.454	-33.258
2	-4.562	-39.856	-44.418	-45.808
3	-0.133	-39.856	-39.990	-38.565
4	4.094	78.518	82.612	79.773
5	-4.029	78.518	74.489	74.983

注: σ_b 为初等梁正应力。

为了解箱梁的几何特性参数 k 变化对剪力滞广义力矩的影响,令参数 k 从0.5开始以0.1为步长增大至1,图4示出了竖向对称集中荷载作用下箱梁截面剪力滞广义力矩随 k 值的变化曲线。从图中可以看出,箱梁剪力滞广义力矩与几何特性参数 k 成负相关,随着 k 值逐渐增大,箱梁剪力滞广义力矩逐渐减小,其中靠近外荷载作用截面的梁段区域以较快的速度衰减,衰减幅度随 k 值的增加缓慢降低。

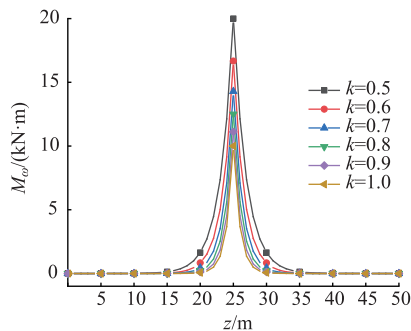


图4 广义力矩随参数 k 变化曲线

Fig. 4 Curves of generalized moment varying with parameter k

为了考察悬臂板宽度变化对不同梁高的箱梁剪力滞几何特性 k 的影响,令悬臂板宽度从0开始以0.4 m为步长增大到4 m,即悬臂板相对宽度比 c/b 从0开始以0.1为步长增大到1,分别计算梁高 h 为1.6, 2.4 m的箱梁跨中截面几何特性参数 k ,图5为参数 k 随 c/b 的变化曲线。从图中可以看出,当 $c/b < 0.5$ 时, k 值随悬臂板宽度的增大先减小后缓慢增加,高宽比 $h/b = 0.6$ 的箱梁变化幅度更大。当 $c/b = 0.5$ 时,参数 k 出现峰值,由图4可知,此时剪力滞

广义力矩有最小值, 且不同高宽比的 k 值相差最小。当 $c/b > 0.5$ 时, k 值随悬臂板宽度的增大而逐渐降低, 而相比高宽比 $h/b = 0.6$ 的薄壁箱梁, 高宽比 $h/b = 0.4$ 的箱梁 k 值随悬臂板宽度的增大衰减幅度较小。

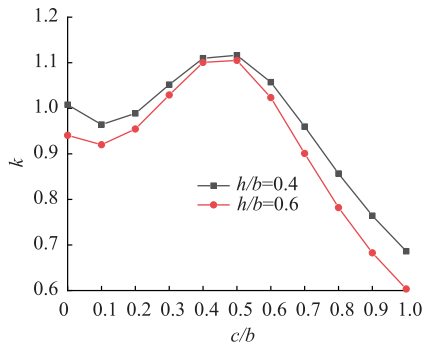


图5 参数 k 随悬臂板相对宽度比变化曲线

Fig. 5 Curves of parameter k varying with relative width ratio of cantilever slab

整体上, 不同梁高的箱梁 k 值随悬臂板相对宽度比的变化曲线相似, 梁高较小的箱梁 k 值更大, 即要使剪力滞广义力矩更小, 则要求箱梁截面高宽比更小。

为明确箱梁截面各板厚度变化对剪力滞几何特性 k 的影响, 保持箱梁其他参数不变, 依次令顶板、腹板和底板厚度从 0.2 m 开始以 0.02 m 为步长增大至 0.4 m, 图 6 为截面几何特性 k 随箱梁壁室各板厚的变化曲线。从图中可以看出, 几何特性参数 k 随顶板厚度的增大而增大, 随着腹板和底板厚度的增大而减小, 其中 k 值随腹板厚度改变引起的降低幅度要大于由底板厚度改变引起的降低幅度。因此, 选择壁厚较大的顶板与壁厚较小的腹板有助于减小薄壁箱梁的剪力滞效应。

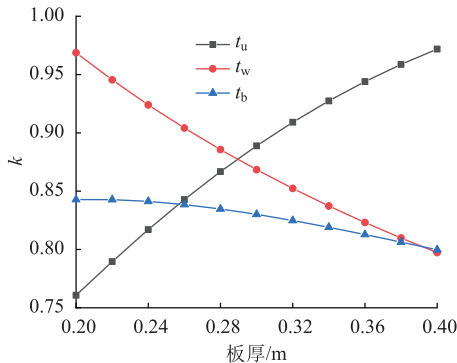


图6 参数 k 随板厚变化曲线

Fig. 6 Curves of parameter k varying with slab thickness

取上述算例中箱梁跨长的一半, 将其约束改为左端固定右端自由的悬臂箱梁进行剪力滞效应的研究, 保持其余参数不变, 以分析截面几何特性 k 变化对箱梁剪力滞效应的影响。在自由端腹板顶面布

置 2×10 kN 的对称竖向集中荷载, 应用本研究建立的公式求出该箱梁剪力滞广义力矩随几何特性参数 k 的变化曲线如图 7 所示。由图可知, 悬臂箱梁截面剪力滞广义力矩随 k 值的分布规律与上述简支箱梁相同, 再次验证了本研究解析理论的正确性。

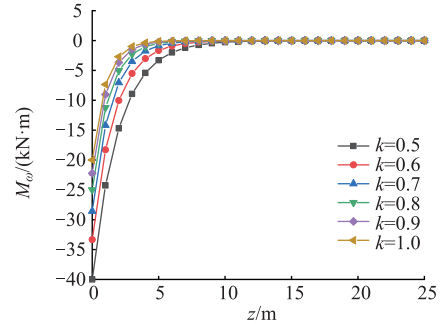


图7 广义力矩随参数 k 变化曲线

Fig. 7 Curves of generalized moment varying with parameter k

5 结论

(1) 选取剪力滞附加挠度作为广义位移建立了控制微分方程, 得到一种反映薄壁箱梁剪力滞效应的几何特性参数 k , 数值算例验证了本研究解析理论的正确性。

(2) 简支箱梁作用不同形式的竖向荷载时剪力滞广义力矩的分布有较大区别。竖向均布荷载作用下, 简支箱梁剪力滞广义力矩在支座处迅速变化, 其余梁跨位置呈水平直线分布。竖向集中荷载作用下, 剪力滞广义力矩在荷载作用截面出现峰值, 而后向简支两端迅速衰减, 只发生在荷载作用截面附近区域。

(3) 剪力滞广义力矩与几何特性参数 k 成负相关, 随着 k 值逐渐增大, 箱梁剪力滞广义力矩逐渐减小, 其中靠近外荷载作用截面的梁段区域以较快的速度衰减, 衰减幅度随 k 值的增加缓慢降低。

(4) 随着悬臂板相对宽度比 c/b 缓慢增大, 几何特性参数 k 呈先减小后增大再减小的变化趋势, c/b 等于 0.5 时参数 k 出现最大值。整体上, 不同梁高的箱梁 k 值随 c/b 的变化曲线相似, 梁高较小的箱梁 k 值更大, 即要使剪力滞广义力矩更小, 则要求箱梁截面高宽比更小。

(5) 几何特性 k 随顶板厚度的增大而增大, 随腹板和底板厚度的增大而减小, 其中 k 值随腹板厚度改变引起的降低幅度要大于由底板厚度改变引起的降低幅度。选择壁厚较大的顶板与壁厚较小的腹板有助于减小箱梁的剪力滞效应。

参考文献:

References:

- [1] 项海帆. 高等桥梁结构理论 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2013.
XIANG Haifan. Advanced theory of bridge structures [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [2] 郭金琼, 房贞政, 郑振. 箱形梁设计理论 [M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2008.
GUO Jinqiong, FANG Zhenzheng, ZHENG Zhen. Design theory of box girder [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [3] YU J, HU S W, ZHANG Z G, et al. Shear lag and related parameter impact researches for twin-cell composite box beam under concentrated loads [J]. Journal of Mechanics, 2017, 33 (4): 443-460.
- [4] 张玉元, 张元海, 张慧. 翼板横向位移对箱梁剪力滞效应的影响 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2022, 52 (2): 247-253.
ZHANG Yuyuan, ZHANG Yuanhai, ZHANG Hui. Influence of lateral displacement of flanges on shear lag effect of box girder [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52 (2): 247-253.
- [5] 安平和, 郭晓光, 时元绪, 等. 箱梁剪力滞翘曲位移函数理论分析 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2020, 53 (8): 692-697.
AN Pinghe, GUO Xiaoguang, SHI Yuanxu, et al. Theoretical analysis of shear lag warping displacement function of box girder [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53 (8): 692-697.
- [6] 张云飞, 焦广如, 陈建兵, 等. 简支蝶形腹板混凝土箱梁剪力滞效应 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (9): 123-131.
ZHANG Yunfei, JIAO Guangru, CHEN Jianbing, et al. Shear-lag effect of concrete box girder with simply supported butterfly web [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41 (9): 123-131.
- [7] LI X Y, WAN S, MO Y L, et al. An improved method for analyzing shear lag in thin-walled box-section beam with arbitrary width of cantilever flange [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 140: 222-235.
- [8] 吴启明, 姜瑞娟, 徐添华, 等. 考虑腹板剪切变形的波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应分析 [J]. 建筑结构学报, 2021, 42 (增 1): 220-228.
WU Qiming, JIANG Ruijuan, XU Tianhua, et al. Analysis on shear-lag effect of composite box girders with corrugated steel webs considering shear deformation of webs [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42 (S1): 220-228.
- [9] 庞建利, 毛云程. 波形钢腹板箱梁正弯矩区的受力性能研究 [J]. 公路交通科技, 2024, 41 (5): 87-96, 107.
PANG Jianli, MAO Yuncheng. Study on mechanical property of sagging moment region of box girder with corrugated steel web [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41 (5): 87-96, 107.
- [10] HE X Y, XIANG Y Q, QIU X, et al. Shear lag including axial balance of box beams by finite segment model [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 189: 107043. doi: 10.1016/j.jcsr.2021.107043
- [11] 刘旭政, 程坤, 吴刚, 等. 大跨波形钢腹板连续箱梁桥有效分布宽度研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (2): 85-92.
LIU Xuzheng, CHENG Kun, WU Gang, et al. Study on effective distribution width of long-span continuous girder bridge with corrugated steel webs [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39 (2): 85-92.
- [12] 周朋, 蔺鹏臻. 变截面连续箱梁剪力滞分析的有限梁段法 [J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15 (4): 948-955.
ZHOU Peng, LIN Pengzhen. Finite segment method of shear lag analysis of continuous box girders with variable height [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15 (4): 948-955.
- [13] SINGH G J, MANDAL S, KUMAR R, et al. Simplified analysis of negative shear lag in laminated composite cantilever beam [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2020, 33 (1): 04019103. doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0001100
- [14] 李夏元, 郭靖宇, 万水, 等. 基于 Timoshenko 梁理论的薄壁箱梁剪力滞效应研究 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (6): 52-60, 94.
LI Xiayuan, GUO Jingyu, WAN Shui, et al. Analysis on shear lag effect of thin-walled box girder based on timoshenko beam theory [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (6): 52-60, 94.
- [15] 张元海, 李琳, 林丽霞, 等. 以附加挠度作为广义位移时薄壁箱梁剪力滞效应的梁段有限元分析 [J]. 土木工程学报, 2013, 46 (10): 100-107.
ZHANG Yuanhai, LI Lin, LIN Lixia, et al. Beam-segment finite element analysis on shear lag effect of thin-walled box girder adopting additional deflection as generalized displacement [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (10): 100-107.
- [16] 张元海, 林丽霞. 薄壁箱梁剪力滞效应分析的初参数法 [J]. 工程力学, 2013, 30 (8): 205-211.
ZHANG Yuanhai, LIN Lixia. Initial parameter method for analyzing shear lag effect of thin-walled box girders [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30 (8): 205-211.
- [17] LUO M, LIN P Z, SUN L X. Analysis of shear lag effect in twin-cell box girders [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 563 (3): 032043. doi: 10.1088/1757-899X/563/3/032043
- [18] 秦翱翔, 刘世忠, 马驰, 等. 单箱双室波形钢腹板-钢底板-混凝土顶板组合箱梁剪力滞效应研究 [J]. 公路交通科技, 2020, 37 (10): 98-106.
QIN Aoao, LIU Shizhong, MA Chi, et al. Study on shear lag effect of single-box twin-cell corrugated steel web-steel floor-concrete roof composite box girder [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37 (10): 98-106.