

DOI: 10.7511/jslx20230516001

基于比拟杆法的变截面连续箱梁剪力滞效应分析

冀伟¹, 石旭辉¹, 罗子钧¹, 罗奎^{*2}, 黄逸航¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070; 2. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082)

摘要:针对现有的剪力滞效应分析方法难以适用于变截面连续箱梁的问题,本文基于比拟杆法提出了一种变截面混凝土连续箱梁剪力滞效应分析方法。首先,利用比拟杆法建立了变截面连续箱梁剪力滞效应的控制微分方程;其次,利用有限元分析结果和试验实测结果对本文理论的正确性和适用性进行了验证,并分析了不同单元类型对剪力滞效应分析的影响;最后,对3跨混凝土连续箱梁悬臂施工过程中的剪力滞效应进行了分析。研究表明,3跨变截面连续梁上翼缘板的剪力滞效应中支座处最明显,中跨跨中处剪力滞效应次之,中支座和中跨跨中之间区域的剪力滞效应可忽略不计。在3跨连续梁的整个悬臂施工过程中,0号块上下翼缘板的剪力滞效应逐渐减小;成桥后,0号块上下翼缘板的剪力滞效应增大。在3跨连续梁的整个悬臂施工过程中,1号块上下翼缘板的正剪力滞效应逐渐减小;1号块上下翼缘板的剪力滞效应减小。研究结论可为变截面连续梁的剪力滞效应分析计算提供参考依据。

关键词:桥梁工程;剪力滞效应;比拟杆法;变截面连续箱梁;悬臂施工

中图分类号:U448.21+5;O312.1

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2024)06-1053-07

1 引言

在箱梁桥的设计过程中,忽略剪力滞效应将会使箱梁的抗弯刚度偏大,致使挠度偏小,使箱梁翼缘板开裂,影响结构安全^[1]。因此,对薄壁箱梁的剪力滞效应进行研究具有重要意义^[2-4]。

薄壁箱梁的剪力滞效应分析方法主要包括能量变分法^[5,6]和比拟杆法^[7]。Luo等^[8]利用能量变分原理推导了箱梁剪力滞效应的微分控制方程,建立了考虑剪切剪滞双重效应的有限段模型。张玉元等^[9]引入剪力滞翘曲修正系数,提出了一种全新的剪力滞翘曲位移模式。卢敏锋等^[10]利用三次抛物线翘曲位移函数对变宽截面箱梁的剪力滞效应进行了分析。林丽霞等^[11]根据轴向荷载作用下箱梁的纵向位移推导了翼缘板纵向应力公式。Zanuy等^[12]分析了T形截面梁顶板的应变分布规律。Gong等^[13]研究了钢底板波形钢腹板组合箱梁截面附加翘曲位移。Zhou^[14]采用有限梁段法研究了剪切剪滞双重效应对悬臂梁和连续梁的挠度影响。赵志峰等^[15]利用比拟杆法分析了变截面箱

梁的剪力滞效应。郭增伟等^[16]利用比拟杆法对变截面悬臂梁的剪力滞效应进行分析,并通过模型试验梁进行了验证。

综上所述,目前对于混凝土连续箱梁剪力滞效应的研究对象主要为等截面连续梁,现有方法难以适用于变截面混凝土连续箱梁的剪力滞效应。针对现有研究的不足,本文利用比拟杆法提出了一种变截面混凝土连续箱梁剪力滞效应分析方法。研究结论可为该桥型的剪力滞效应分析提供参考依据。

2 比拟杆法

2.1 加劲薄板等效厚度和加劲杆等效面积计算

利用比拟杆法分析时,做出以下基本假设:

(1)加劲杆-薄板等效体系中,假定加劲杆只承担轴力,薄板传递面内剪力,忽略泊松效应。

(2)薄板的轴向抗压能力忽略不计。

选取3跨变截面连续箱梁进行分析,其截面尺寸如图1所示。将变截面箱梁离散为由加劲杆和薄板组成的加劲杆-薄板系统,如图2所示。

收稿日期:2023-05-16;修改稿收到日期:2023-06-13.

基金项目:国家自然科学基金(52168019);甘肃省重点研发计划-工业类项目(23YFGA0043)资助.

作者简介:冀伟*(1982-),男,博士,教授.

引用本文:冀伟,石旭辉,罗子钧,等.基于比拟杆法的变截面连续箱梁剪力滞效应分析[J].计算力学学报,2024,41(6):1053-1059.

Ji Wei, Shi Xu-hui, Luo Zi-jun, et al. Theoretical analysis for shear-lag effect of variable box section continuous girder based on bar simulation method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(6): 1053-1059.

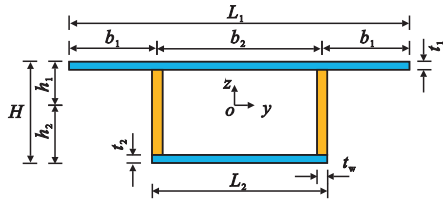


图1 箱梁截面
Fig. 1 Cross section of box girder

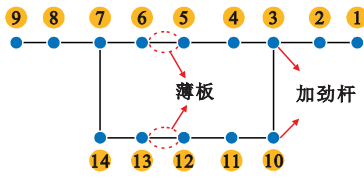


图2 加劲杆-薄板结构
Fig. 2 Equivalent structure of stiffening bar-plate system

根据上下翼缘板关于截面形心的抗弯刚度相等来计算薄板的等效厚度,按照上下翼缘板弯曲应力相等求解腹板等效系数 β_1 和 β_2 ,并求解加劲杆在不同位置的等效面积。加劲薄板的等效厚度 $t_{eu}(x)$ 和 $t_{eb}(x)$ 可表示为

$$t_{eu}(x) = \left(1 - \frac{t_1(x)}{2h_1(x)}\right)^2 t_1(x) \quad (1)$$

$$t_{eb}(x) = \left(1 - \frac{t_2(x)}{2h_2(x)}\right)^2 t_2(x) \quad (2)$$

式中 $h_1(x)$ 和 $h_2(x)$ 分别为上下翼缘板到截面形心的距离; $t_1(x)$ 和 $t_2(x)$ 分别为上下翼缘板的厚度。

与腹板不相交的加劲杆,上下翼缘板处加劲杆的等效面积 $A_{eui}(x)$ 和 $A_{ebi}(x)$ 为

$$A_{eui}(x) = t_{eu}(x)(y_{i+1} - y_{i-1})/2 \quad (3)$$

$$A_{ebi}(x) = t_{eb}(x)(y_{i+1} - y_{i-1})/2 \quad (4)$$

式中 y_{i+1} 和 y_{i-1} 分别为第 $i+1, i-1$ 号加劲杆到截面形心的横向距离。

与腹板相交的加劲杆,其等效面积 $A_{euj}(x)$ 和 $A_{ebj}(x)$ 为

$$A_{euj}(x) = 2\beta_1 H(x)t_w(x) + t_{eu}(x)(y_{i+1} - y_{i-1})/2 \quad (5)$$

$$A_{ebj}(x) = 2\beta_2 H(x)t_w(x) + t_{eb}(x)(y_{i+1} - y_{i-1})/2 \quad (6)$$

$$\beta_1(x) = \frac{I(x)}{H(x)h_1(x)} - \frac{(2b_1 + b_2)t_{eu}(x)}{2H(x)t_w(x)} \quad (7)$$

$$\beta_2(x) = \frac{I(x)}{H(x)h_2(x)} - \frac{b_2 t_{eb}(x)}{2H(x)t_w(x)} \quad (8)$$

式中 $H(x)$ 为梁高, β_1 和 β_2 分别为上下翼缘板面

积等效系数, b_1 为腹板中心线至上翼板外边缘的距离, b_2 为腹板中心线之间的距离, $t_w(x)$ 为腹板厚度。

2.2 控制微分方程的建立

变截面箱梁的截面面积随桥梁纵向坐标改变而改变,加劲杆的面积也将随之变化。在建立微分方程的过程中产生关于截面面积的微分形式会造成多余未知数无法消除,难以求解结果。需要联立协调方程、平衡方程及物理方程进行求解。

以上翼缘板为例进行说明,如图3所示。根据加劲杆的轴力和剪力的平衡关系建立平衡方程,如式(9)所示,并利用加劲杆轴向变形和相邻薄板剪切变形的协调关系建立协调方程,如式(10)所示。

$$\frac{dN_i(x)}{dx} = q_{i+1,i}(x) - q_{i,i-1}(x) - q_{Ei}(x) \quad (9)$$

$$\frac{d\gamma_{i,i-1}(x)}{dx} = \frac{1}{Ea_{i,i-1}} \left(\frac{N_i(x)}{A_{eui}(x)} - \frac{N_{i-1}(x)}{A_{eui-1}(x)} \right) \quad (10)$$

式中 E 为弹性模量, A_{eui} 为上翼缘板第 i 根加劲杆的面积, $a_{i,i-1}$ 为上翼缘板第 i 根和第 $i-1$ 根加劲杆间的水平距离, $q_{i,i-1}(x)$ 和 $\gamma_{i,i-1}(x)$ 分别为上翼缘板第 i 根和第 $i-1$ 根加劲杆间薄板面内的剪力流函数和剪应变函数, $N_i(x)$ 为上翼缘板第 i 根加劲杆的轴力, $q_{Ei}(x)$ 为腹板内的剪力流函数。加劲杆间薄板剪力流函数为

$$q_{i,i-1}(x) = \gamma_{i,i-1}(x)t_1(x)G \quad (11)$$

联立式(9~11),求解出上翼缘板的剪力滞效应控制方程为

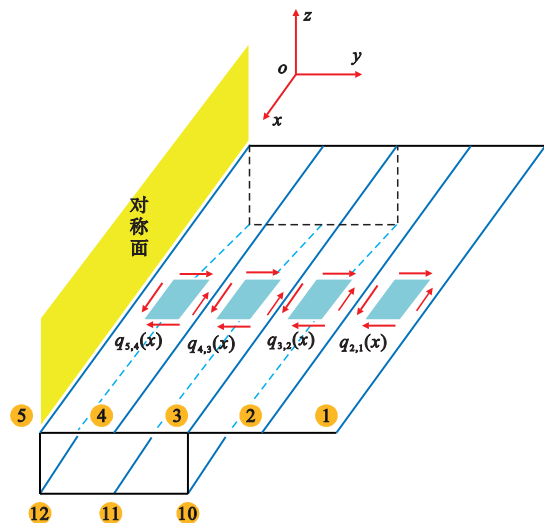


图3 加劲杆-薄板等效体系(右半部分)
Fig. 3 Force equilibrium of bar-plate system(right half part)

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dN_1(x)}{dx} &= q_{2,1}(x) \\ \frac{dN_2(x)}{dx} &= q_{3,2}(x) - q_{2,1}(x) \\ \frac{dN_3(x)}{dx} &= q_{4,3}(x) - q_{3,2}(x) - q_{E3}(x) \\ \frac{dN_4(x)}{dx} &= q_{5,4}(x) - q_{4,3}(x) \\ \frac{dN_5(x)}{dx} &= -q_{5,4}(x) \\ \frac{dq_{2,1}(x)}{dx} &= \frac{t_1(x)G}{Ea_{2,1}} \left(\frac{N_2(x)}{A_{eu2}(x)} - \frac{N_1(x)}{A_{eu1}(x)} \right) \\ \frac{dq_{3,2}(x)}{dx} &= \frac{t_1(x)G}{Ea_{3,2}} \left(\frac{N_3(x)}{A_{eu3}(x)} - \frac{N_2(x)}{A_{eu2}(x)} \right) \\ \frac{dq_{4,3}(x)}{dx} &= \frac{t_1(x)G}{Ea_{4,3}} \left(\frac{N_4(x)}{A_{eu4}(x)} - \frac{N_3(x)}{A_{eu3}(x)} \right) \\ \frac{dq_{5,4}(x)}{dx} &= \frac{t_1(x)G}{Ea_{5,4}} \left(\frac{N_5(x)}{A_{eu5}(x)} - \frac{N_4(x)}{A_{eu4}(x)} \right) \end{aligned} \right. \quad (12)$$

以比拟杆等效梁分离体为研究对象,根据力矩平衡方程对剪力流进行推导。

以变截面比拟杆等效梁自由端至 x 处的①号隔离体为研究对象,如图4所示。上翼缘板加劲杆在均布荷载作用下的轴力总和为 $N_u(x)$,腹板对上翼板产生的水平剪力流为 $q_{Ei}(x)$ 。

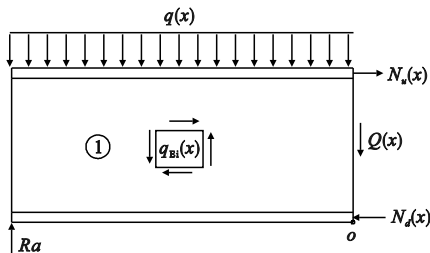


图4 隔离体受力简图
Fig. 4 Force diagram of free-body

$$N_u(x) = 2 \int_0^x q_{Ei}(x) dx \quad (13)$$

对于 O 点建立力矩平衡方程:

$$M(x) = N_u(x)H(x) + Ra x = f(x) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} q_{Ei}(x) &= \frac{1}{2} \frac{dN_u(x)}{dx} = \frac{1}{2} \frac{d}{dx} \frac{M(x) - Ra x}{H(x)} \\ &= \frac{Q(x) - Ra}{2H(x)} - \frac{M(x) - Ra x}{2H(x)^2} \frac{dH(x)}{dx} \end{aligned} \quad (15)$$

式中 $M(x)$ 和 $Q(x)$ 分别为 x 处的弯矩和剪力, Ra 为边支座处支座反力, $f(x)$ 为连续梁的荷载弯矩。

对于3跨连续梁,其边支座沿纵向无约束,则

各加劲杆上的轴力均为0,其边界条件可表示为

$$N_i |_{x=0} = 0 \quad (16)$$

对于3跨连续梁的中支座,各加劲薄板在3跨连续梁中支座处的竖向剪切变形可忽略,由式(11)可知中支座的边界条件可表示为

$$q_{i,i-1} |_{x=l} = 0 \quad (17)$$

式中 l 为3跨连续梁边跨长度。

根据边界条件,利用在MATLAB软件求解式(12),对3跨连续梁的剪力滞效应进行分析。

3 理论解的正确性验证

3.1 试验验证

利用文献[2]的模型试验对本文理论的正确性进行验证,有机玻璃模型详细参数见文献[2]。

3跨变截面连续箱梁的均布荷载集度为5 N/cm。利用ANSYS有限元软件建立了不同单元的3跨变截面连续梁的三维有限元模型,包括实体单元、壳单元和实体-板壳单元三种有限元模型。

将3跨变截面连续梁III-III截面上翼缘板的剪力滞效应的理论结果与试验实测结果和有限元结果进行对比,如图5所示。从图5可以看出,均布荷载的作用下,3跨变截面连续梁剪力滞效应的理论结果与试验结果和有限元结果吻合较好。结果表明,本文理论用于变截面连续梁的剪力滞效应计算具有较高的精度。

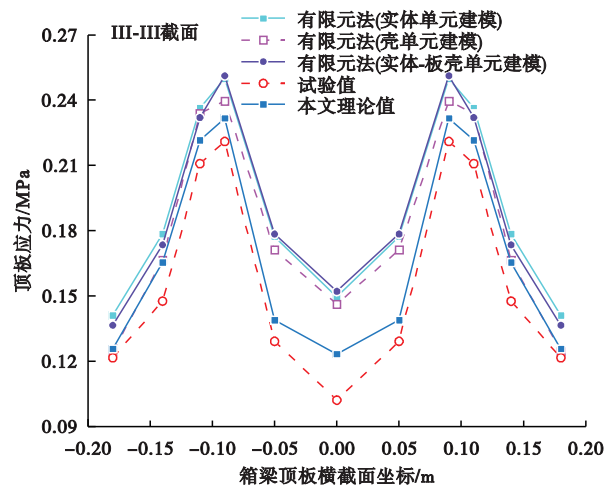


图5 III-III截面正应力对比
Fig. 5 Comparison of normal stress of III-III section

3.2 不同有限元结果对比

利用ANSYS实体单元、壳单元及实体单元和壳单元混合建模的方式建立3种不同的有限元模型,根据截面各测点处的弯曲正应力计算剪力滞系数。

利用式(18)计算出各测点截面在平截面假定

下的正应力,根据3种ANSYS模型计算截面各测点考虑剪力滞效应的正应力,由式(19)计算出各测点的剪力滞系数。3个截面的剪力滞系数对比列入表1,并将不同单元类型的有限元模型计算的正应力与理论结果和实测结果进行比较,如图5~图7所示。

$$\sigma_x = (M/I)y \quad (18)$$

$$\lambda = \sigma_s / \sigma_x \quad (19)$$

式中 σ_x 为 x 处平截面假定下的弯曲正应力, M 为

荷载作用下 x 处的弯矩, I 为箱梁 x 处截面的主惯性矩, y 为距中性层的距离, σ_s 为 x 处考虑剪力滞效应下的弯曲正应力。

从表1可以看出,在I-I截面出现了较为明显的正剪力滞效应,剪力滞系数最大为1.3380,最小为0.9237。从图6可以看出,3种有限元模型的结果较为接近,壳单元结果最接近实测结果。结果表明,分析变截面连续梁的跨中截面剪力滞效应时应采用壳单元模型进行分析。

表1 各测点截面的剪力滞系数

Tab.1 Shear lag coefficient of each measuring point section

节点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I-I截面	0.92	1.05	1.34	1.34	1.05	0.92	1.34	1.33	1.10
II-II截面	0.80	0.94	1.43	1.38	0.77	0.57	1.35	1.41	0.82
III-III截面	0.80	0.97	1.38	1.44	0.85	0.67	1.43	1.48	0.78

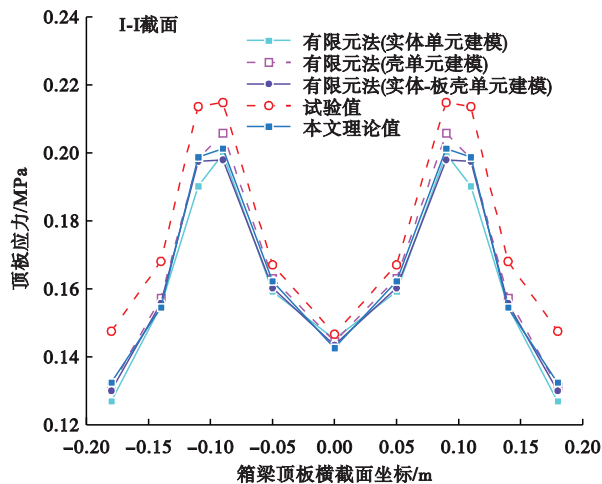


图6 I-I截面的应力结果

Fig.6 Stress results of I-I section

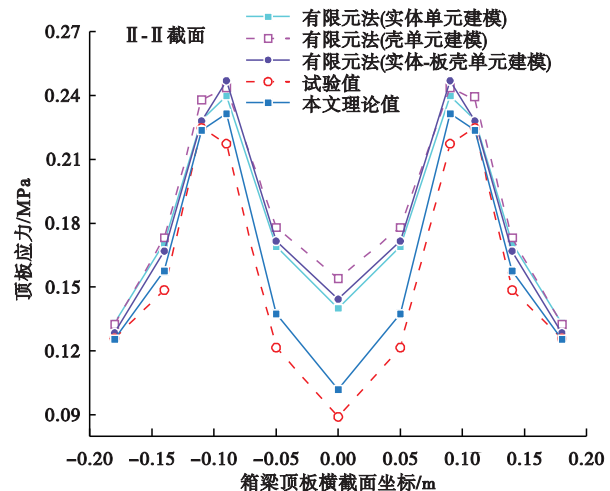


图7 II-II截面应力结果

Fig.7 Stress results of II-II section

从表1可以看出,II-II截面的正剪力滞效应更为明显,剪力滞系数最大为1.43,最小为0.57,在II-II截面上翼缘板中心处的应力远小于与腹板交接处的应力。从图7可以看出,3种有限元模型中实体-板壳单元模型的计算结果与实测结果较为接近。结果表明,分析变截面连续梁墩顶截面靠近跨中处的剪力滞效应时应采用实体-板壳单元模型进行分析。

由表1可知,III-III截面的剪力滞趋势与II-II截面的剪力滞趋势较为接近,剪力滞系数最大为1.48,最小为0.67。从图5可以看出,3种有限元模型所得结果较为接近,壳单元结果最接近实测结果。结果表明,分析变截面连续梁墩顶靠近边跨截面的剪力滞效应时应采用壳单元模型进行分析。

从图5~图7可以看出,I-I截面的五种结果差别较小,但对于支点截面II-II和III-III,本文理论

值和试验解与ANSYS的差别较大,这可能是由于有限元模型的支座截面处存在明显的应力集中现象,使截面顶板顶缘的整体应力水平偏高。

4 施工过程中的剪力滞效应分析

选取某3跨变截面连续梁施工阶段的剪力滞效应进行分析,其跨径布置为(48.75+80+48.75)m,混凝土为C50。箱梁变截面采用二次抛物线,截面尺寸如图8所示。进行悬臂施工时将连续梁划分为9个施工阶段,施工段长度布置为(4×3.5+5×4.0)m。

利用Midas和ANSYS建立2种有限元模型,其建模方式与第2节的试验梁模型梁的建模方式相同,并利用有限元法对3跨连续梁悬臂施工过程中的剪力滞效应进行研究。

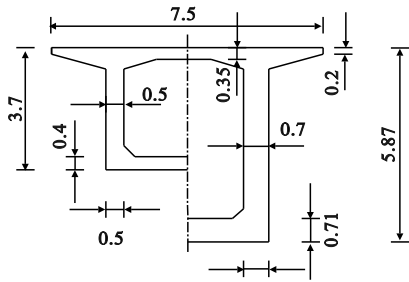


图8 箱梁截面尺寸(单位:m)

Fig.8 Section dimension drawing(unit:m)

利用 Midas 有限元模型计算初等梁理论的弯曲正应力,同时采用 ANSYS 有限元模型计算考虑剪力滞效应的弯曲正应力,并根据式(19)计算自重作用下 0 号块上下翼缘板在施工阶段和成桥阶段的剪力滞系数,结果如图 9 和图 10 所示。

由图 9 可以看出,在自重作用下,0 号块上翼缘板出现明显的正剪力滞效应。3 号块浇筑完成后,0 号块上翼缘板的剪力滞效应最为明显,其最大值为 1.14。在整个施工过程中,0 号块上翼缘板的正剪力滞效应逐渐减小,成桥阶段(即合拢段完

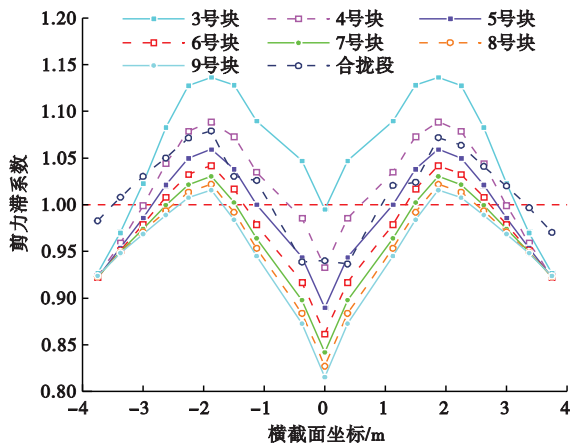


图9 0号梁端截面顶板剪力滞系数

Fig.9 Shear lag coefficient of top plate of 0# beam end section

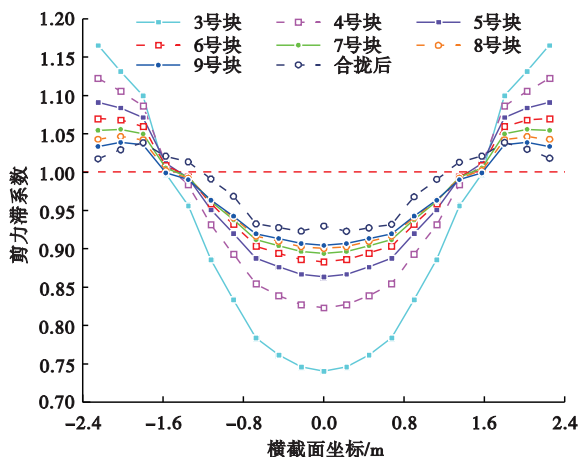


图10 0号梁端截面底板剪力滞系数

Fig.10 Shear lag coefficient of bottom plate of 0# beam end section

成后),0 号块上翼缘板的剪力滞效应相对于浇筑 9 号块后明显增大,最大增幅为 13.25%。

由图 10 可以看出,在自重作用下,0 号块截面下翼缘板出现明显的正剪力滞效应。3 号块浇筑完成后,0 号块下翼缘板的剪力滞效应最为明显,最大值为 1.17。在整个施工过程中,0 号块的下翼缘板的正剪力滞效应逐渐减小,成桥阶段(即合拢段完成后),0 号块下翼缘板的剪力滞效应相对于浇筑 9 号块后略有增大,最大增幅为 2.79%。

自重作用下,1 号块上下翼缘板在施工阶段和成桥阶段的剪力滞系数如图 11 和图 12 所示。

从图 11 可以看出,在自重作用下,1 号块上翼缘板出现明显的正剪力滞效应。3 号块浇筑完成后 1 号块上翼缘板的正剪力滞效应最明显,剪力滞系数最大值为 1.06。在整个施工过程中,1 号块上翼缘板正剪力滞效应逐渐减小,甚至出现负剪力滞

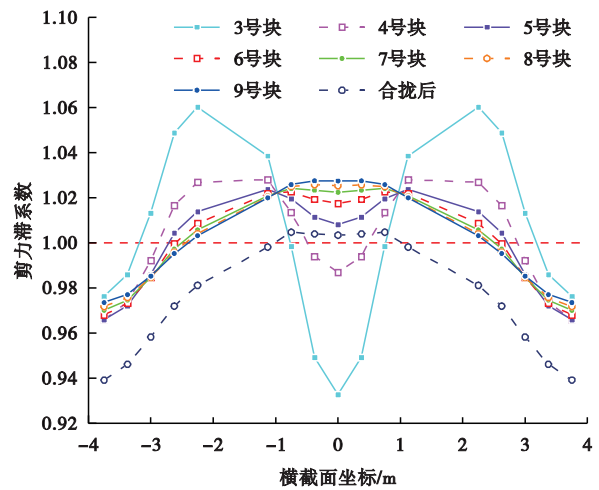


图11 1号梁端截面顶板剪力滞系数

Fig.11 Shear lag coefficient of top plate of 1# beam end section

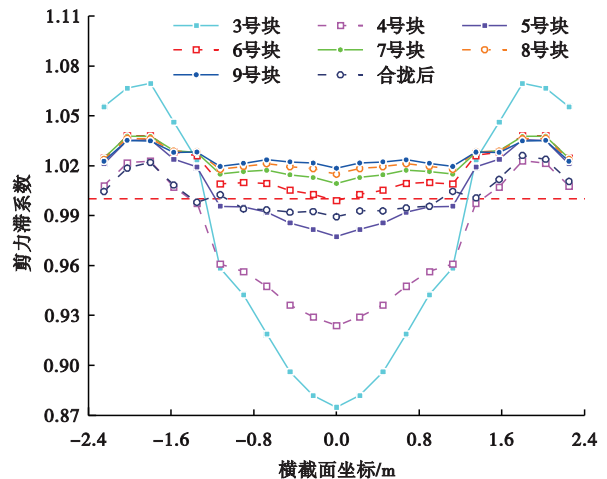


图12 1号梁端截面底板剪力滞系数

Fig.12 Shear lag coefficient of bottom plate of 1# beam end section

效应,成桥阶段(即合拢段完成后),1号块上翼缘板的剪力滞效应相对于浇筑9号块后略有减小,最大减幅为3.66%。

由图11可以看出,在自重作用下,1号块截面下翼缘板出现明显的正剪力滞效应。3号块浇筑完成后,1号块下翼缘板的剪力滞效应最为明显,剪力滞系数最大值为1.07。在整个施工过程中,1号块下翼缘板的正剪力滞效应逐渐减小,成桥阶段(即合拢段完成后),1号块下翼缘板的剪力滞效应相对于浇筑9号块后略有减小,最大减幅为3.05%。

施工过程中,在自重作用下,1/4跨截面(4号块梁端截面)上下翼缘的剪力滞系数变化规律与1号块截面类似,由于篇幅原因,不再赘述。

5 结论

(1)通过有机玻璃连续梁模型的有限元结果和试验实测结果验证了本文方法的正确性和适用性。结果表明,本文方法精度较高,可用于变截面连续箱梁的剪力滞效应分析。

(2)3跨变截面连续梁上翼缘板的剪力滞效应在中支座处最明显,高达1.43,中跨跨中处剪力滞效应次之,中支座和中跨跨中之间区域的剪力滞效应可忽略不计。

(3)在3跨连续梁的整个悬臂施工过程中,0号块上下翼缘板的剪力滞效应逐渐减小。成桥阶段(即合拢段完成后),0号块上下翼缘板的剪力滞效应相对于浇筑9号块后增大13.25%和2.79%。

(4)在3跨连续梁的整个悬臂施工过程中,1号块上下翼缘板的剪力滞效应逐渐减小。成桥阶段(即合拢段完成后),1号块上下翼缘板的剪力滞效应相对于浇筑9号块后减小3.66%和3.05%。

参考文献(References):

- [1] 张元海,胡玉茹,林丽霞.基于修正翘曲位移模式的薄壁箱梁剪力滞效应分析[J].土木工程学报,2015,48(6):44-50. (ZHANG Yuan-hai, HU Yu-ru, LIN Li-xia. Analysis on shear lag effect analysis of thin-walled box girders based on a modified warping displacement mode[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(6):44-50. (in Chinese))
- [2] Luo Q Z, Wu Y M, Li Q S, et al. A finite segment model for shear lag analysis[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(14):2113-2124.
- [3] ZHANG Y H, LIN L X. Shear lag analysis of thin-

- walled box girders based on a new generalized displacement[J]. *Engineering Structures*, 2014, 61: 73-83.
- [4] Luo Q Z, Tang J, Li Q S. Finite segment method for shear lag analysis of cable-stayed bridges[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2002, 128(12): 1617-1622.
- [5] 蔺鹏臻,刘凤奎,冀伟,等.变分原理分析混凝土箱梁的剪力滞效应[J].铁道学报,2013,35(2):93-98. (LIN Peng-zhen, LIU Feng-kui, JI Wei, et al. Analysis on shear lag effect of concrete box beam by variational principle[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2013, 35(2):93-98. (in Chinese))
- [6] Zhu L, Su R K L. Analytical solutions for composite beams with slip, shear-lag and time-dependent effects[J]. *Engineering Structures*, 2017, 152:559-578.
- [7] Cambroner-Barrientos F, Diaz-del-Valle J, Martínez-Martínez J A. Beam element for thin-walled beams with torsion, distortion, and shear lag[J]. *Engineering Structures*, 2017, 143:571-588.
- [8] Luo Q Z, Wu Y M, Tang J, et al. Experimental studies on shear lag of box girders[J]. *Engineering Structures*, 2002, 24(4):469-477.
- [9] 张玉元,张元海,张慧,等.箱形梁剪力滞和剪切效应引起的附加挠度分析[J].计算力学学报,2018,35(5):619-626. (ZHANG Yu-yuan, ZHANG Yuan-hai, ZHANG Hui, et al. Analysis on additional deflection induced by effects of shear lag and shear deformation in box girders[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2018, 35(5):619-626. (in Chinese))
- [10] 卢敏锋,丁南宏.变宽截面箱梁剪力滞效应研究[J].计算力学学报,2022,39(6):818-823. (LU Min-feng, DING Nan-hong. Research on shear lag effect of box girder with variable width section[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, 39(6): 818-823. (in Chinese))
- [11] 林丽霞,丁南宏,吴亚平,等.简支及悬臂箱梁在角隅轴向荷载作用下的翼板纵向应力[J].计算力学学报,2019,36(3):401-406. (LIN Li-xia, DING Nan-hong, WU Ya-ping, et al. Longitudinal stresses in flange plate of simple-supported and cantilever box girder with axial load acting on the section corners[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2019, 36(3):401-406. (in Chinese))
- [12] Zanuy C, Pilar Martínez E, Merino R, et al. Experimental analysis of shear-lag effect in reinforced concrete T-beams [J]. *Engineering Structures*, 2022, 256:114009.
- [13] Gong B J, Liu S Z, Mao Y N, et al. Correction of shear

lag warping function of steel bottom-Corrugated steel web box girder[J]. *Structures*,2022,37:227-241.

[14] Zhou S J. Finite beam element considering shear-lag effect in box girder[J]. *Journal of Engineering Mechanics*,2010,136(9):1115-1122.

[15] 赵志峰, 简鹏臻, 方炜彬. 比拟杆法分析研究单箱三室箱梁剪力滞效应[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(4): 697-704. (ZHAO Zhi-feng, LIN Peng-zhen, FANG Wei-bin. The bar simulation method for shear lag effect of three-cell box girders[J]. *Journal of*

Railway Science and Engineering,2016,13(4):697-704. (in Chinese))

[16] 郭增伟, 李龙景, 张俊波. 变截面悬臂箱梁剪力滞效应的比拟杆分析方法[J]. 土木工程学报, 2019, 52(8): 72-80. (GUO Zeng-wei, LI Long-jing, ZHANG Jun-bo. Theoretical analysis for shear-lag effect of variable box section cantilever girder based on bar simulation method[J]. *China Civil Engineering Journal*,2019, 52(8):72-80. (in Chinese))

Theoretical analysis for shear-lag effect of variable box section continuous girder based on bar simulation method

JI Wei¹, SHI Xu-hui¹, LUO Zi-jun¹, LUO Kui^{*2}, HUANG Yi-hang¹

(1. College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, 730070, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Aiming at the problem that the existing methods for shear lag effect analysis are difficult to apply to a variable cross-section continuous box girder, this paper proposes a methods for shear lag effect analysis for variable cross-section continuous concrete box girder based on the bar analogy method. Firstly, the governing differential equation of shear lag of variable cross-section continuous box girder is established by using the bar analogy method. Secondly, the correctness and applicability of the proposed method are verified by finite element analysis results and experimental results, and the influence of different element types on shear lag is analyzed. Finally, the shear lag effect in the cantilever construction process of three-span concrete continuous box girder is analyzed. The results show that the shear lag effect of the flange plate on the three-span variable cross-section continuous beam is the most obvious at the support, followed by the shear lag effect at the middle of the middle span, and the shear lag effect between the middle support and the middle span is negligible. During the whole cantilever construction process of a three-span continuous beam, the shear lag effect of the upper and lower flange plates of the block 0 radually decreases. After the bridge is completed, the shear lag effect of the upper and lower flange plates of the block 0 increases. During the whole cantilever construction process of the three-span continuous beam, the positive shear lag effect of the upper and lower flange plates of block 1 gradually decreases. The shear lag effect of the upper and lower flange plates of block 1 is reduced. The conclusions can provide reference for the analysis and calculation of shear lag effect of variable cross-section continuous beams.

Key words: bridge engineering; shear lag effect; bar simulation method; variable cross-section continuous box girder; cantilever construction