

大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁桥剪力滞效应研究

刘旭政¹,程 坤¹,陈 晔²,张春荣²

(1. 华东交通大学土木建筑工程学院,江西 南昌 330013; 2. 江西交通设计研究院
有限责任公司,江西 南昌 330002)

摘 要 目的 确定影响剪力滞系数的主要几何参数,总结计算翼缘有效宽度比的经验公式. 方法 基于有限元软件 Midas/FEA,计算集中(均布)荷载作用下腹板厚度、顶板厚度、荷载类型、宽跨比等因素对大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁剪力滞效应的影响,找出其中对剪力滞效应有主要影响的几何参数,利用数据回归分析方法研究翼缘有效分布宽度取值问题. 结果 剪力滞效应受荷载作用类型影响较大. 明确宽跨比是影响箱梁剪力滞效应的主要几何参数. 结论 建立了集中荷载作用下波形钢腹板组合箱梁翼缘有效分布宽度计算的经验公式.

关键词 桥梁工程;剪力滞;组合箱梁;波形钢腹板;有限元分析

中图分类号 TU375.4 文献标志码 A

Shear Lag Effect of Long Span Composite Continuous Box-Girder Bridge with Corrugated Steel Webs and Variable Cross-section

LIU Xuzheng¹, CHENG Kun¹, CHEN Ye², ZHANG Chunrong²

(1. School of Civil Engineer and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013; 2. Communications Design research institute Co., Ltd of Jiangxi Province, Nanchang, China, 330002)

Abstract: In order to confirm the primary geometric parameter of shear lag effect and establish experiential formulas of effective width ratio, shear lag effect of long-span composite continuous box-girder bridge with corrugated steel webs and variable cross-section were analyzed. Based on finite element analysis software Midas/FEA, the influencing factors such as web thickness, top slab thickness, load form, width-span ratio, were analyzed under concentrated load condition and uniform load conditions. Then the primary geometric parameters of all were found out, and the theoretical value for effective flange width were discussed based on polynomial regression method. The results show that load type had great influence on shear lag effect; Width-span ratio was confirmed as the mainly factor working on shear lag effect among all the geometric parameters. Finally, the

收稿日期:2017-02-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51468019;51568020)

作者简介:刘旭政(1980—),男,副教授,博士,主要从事大跨度桥梁安全性评价的研究.

experiential formulas of the effective flange width ratio under concentrated load were put forward with the only factor of width span ratio.

Key words: bridge engineering; shear lag; composite box-girder; corrugated steel webs; finite element analysis

近年来,国内外学者在理论研究、有限元分析和工程实践相结合的基础上,对剪力滞效应开展了许多相关的研究.朱世峰,舒志云,杨彦海等^[1-3]系统分析了荷载作用形式、预应力对剪力滞效应的影响,以及剪力滞效应顺桥向分布规律;柴永飞^[4]分析了宽跨比、宽高比、腹板波高等几何参数对翼缘有效分布宽度的影响;李光玲^[5]对单箱三室变截面波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应进行了参数敏感性分析,归纳了有效分布宽度计算的公式;肖立江^[6]系统分析了荷载横向位置对波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应的影响;刘勇^[7]利用有限差分法推导了变截面箱梁剪力滞效应计算式;S. S. CHEN^[8]等运用能量变分法推导出了单箱双室、单箱三室波形钢腹板箱梁剪力滞效应解析解.目前,国内外学者对于波形钢腹板组合箱梁剪力滞的研究多针对某一特定结构参数组合箱梁或者简支波形钢腹板组合梁桥进行研究.对于大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁剪力滞的研究较少,同时地方规范《公路波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥设计规范》(DB41—2010)中对波形钢腹板组合箱梁翼缘有效宽度取值问题也没有做出规定.针对这一现状,笔者依据国内在建大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁桥,系统分析其腹板厚度、顶板厚度、宽高比、宽跨比主要结构参数,荷载类型对剪力滞效应的影响,明确其中对剪力滞效应有主要影响的结构参数,旨在建立翼缘有效宽度比计算的经验公式.

1 工程概况

江西南昌境内在建某大跨度连续波形钢腹板组合连续箱梁桥,跨径组成为 69 m +

4 × 120 m + 69 m,墩顶梁端 4.8 m 为混凝土梁,其余梁段为波形钢腹板与混凝土顶底板的组合结构,主梁断面采用直腹板箱梁断面.中跨桥墩墩顶截面梁高、跨中截面梁高分别为 7.2 m、3.5 m,相应的高跨比分别为 1/16.67、1/34.29.单箱箱梁顶板宽 16 m,底板宽 10 m,翼缘板悬臂长 3.0 m,箱梁顶板横坡 2%,底面水平.主梁顶底板采用 C55 混凝土,腹板采用 1600 型波形钢腹板,厚度为 18 mm,材料参数如表 1 所示.

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料	强度等级	弹性模量/MPa	重力密度/(kN·m ⁻³)
混凝土	C55	35 500	25
波形钢腹板	Q345C	206 000	76.98

2 有限元分析

2.1 有限元模型的建立

采用有限元分析软件 Midas/FEA 建立三维有限元模型,利用对称性,建立半桥模型.顶底板采用自由网格划分,共划分为 210 126 个单元,410 825 个节点.顶底板采用 3D 实体单元,波形钢腹板采用 2D 板单元.在建模时通过“印刻”功能将波形钢腹板波折曲线印刻到混凝土顶底板上,保证划分网格时二者能自动耦合,实现两种材料共同工作.组合箱梁有限元模型如图 1 所示.

2.2 剪力滞效应有限元分析

按照剪力滞系数的定义,笔者采用简化方法计算剪力滞系数,在截面顶、底板分别取若干个点,计算出各个点的正应力,并据此求出平均正应力.以平均正应力作为初等梁理论计算的翼缘板正应力,各点的正应力视为考虑剪力滞效应翼缘板上实际正应力,然后

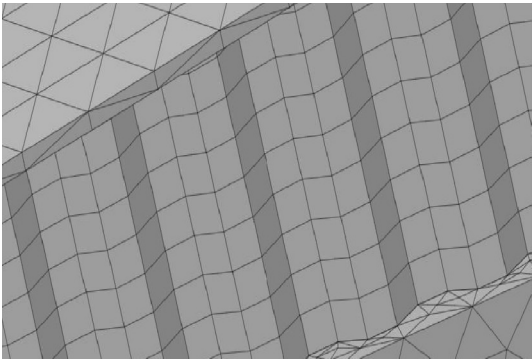


图1 模型有限元网格

Fig. 1 Finite element mesh of model

相除即可得到各点剪力滞系数.同时引入有效宽度比来考虑波形钢腹板组合箱梁的剪力滞效应.

翼缘有效宽度比 ϕ 为

$$\phi = \frac{b_e}{b}.$$

(1)

式中: b_e 为翼缘有效宽度; b 为翼缘实际宽度.

翼缘有效宽度 b_e 为

$$b_e = \frac{\int_b \sigma d_z}{\sigma_{\max}}.$$

(2)

式中: σ_{\max} 为翼缘最大正应力; σ 为翼缘实际正应力; z 为沿横截面宽度方向的坐标.

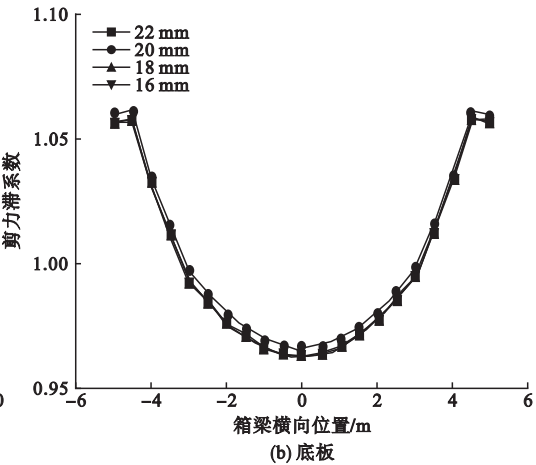
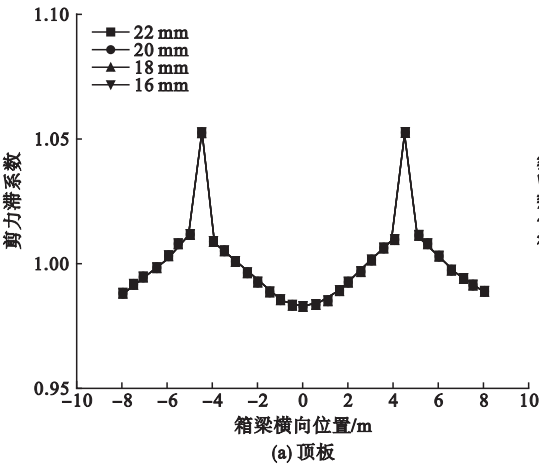


图2 均布荷载作用下中跨跨中截面剪力滞系数

Fig. 2 Shear lag coefficients in mid-span cross-section of middle span under uniform load

从图2与图3可以看出,波形钢腹板厚度从16 mm变化到22 mm时,无论是在均布荷载还是集中荷载作用下,跨中截面

3 剪力滞效应影响因素分析

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)确定荷载效应,采用公路—I级车道荷载,按一个设计车道布置,跨中截面施加360 kN的集中力,沿顺桥向施加10.5 kN/m的均布荷载.集中或均布荷载均横向对称布置于两腹板处.

影响剪力滞效应的因素很多^[9-20],笔者主要分析腹板厚度、顶板厚度、宽高比等因素对波形钢腹板组合连续箱梁剪力滞效应的影响.选取墩顶截面、跨中截面为控制截面,从控制截面提取分析结果,以控制截面上(下)翼缘板中心为坐标原点,选取若干个输出节点,图中箱梁横向位置坐标即为各输出节点横坐标.

3.1 箱梁几何参数对剪力滞效应的影响

3.1.1 腹板厚度

现假定3种和基本截面不同的腹板厚度,即分别对腹板厚度为16 mm、18 mm、20 mm、22 mm时箱梁的剪力滞效应进行分析,得出集中与均布荷载作用下控制截面剪力滞系数如图2、图3所示.

顶底板剪力滞系数分布基本一致.由此说明,腹板厚度变化对翼板的剪力滞效应影响很小.

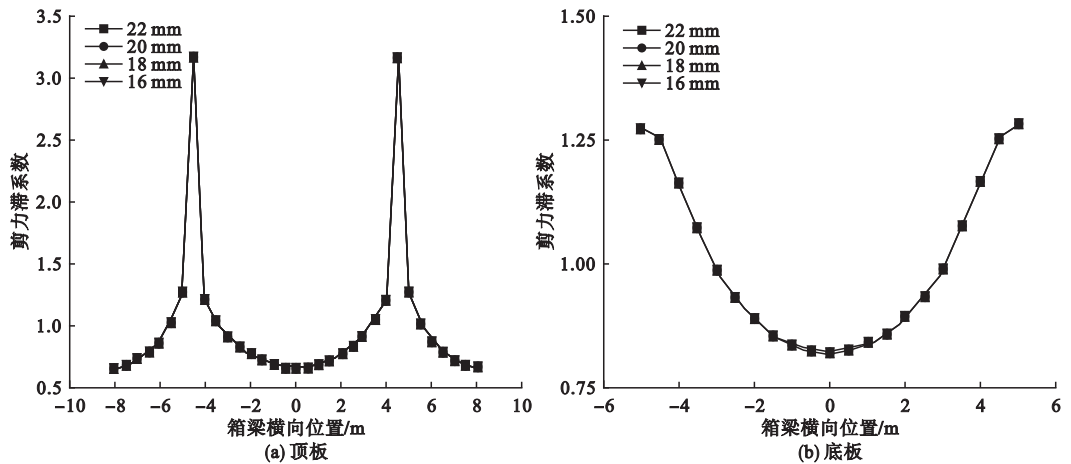


图 3 集中荷载作用下中跨跨中截面剪力滞系数

Fig. 3 Shear lag coefficients in mid-span cross-section of middle span under concentrated load

3.1.2 顶板厚度

现假定 3 种和基本截面不同的顶板厚度进行分析,即分别对箱梁顶板厚度为 0.3 m、

0.4 m、0.5 m、0.6 m 时剪力滞效应进行对比分析,得到控制截面剪力滞系数如图 4 所示.

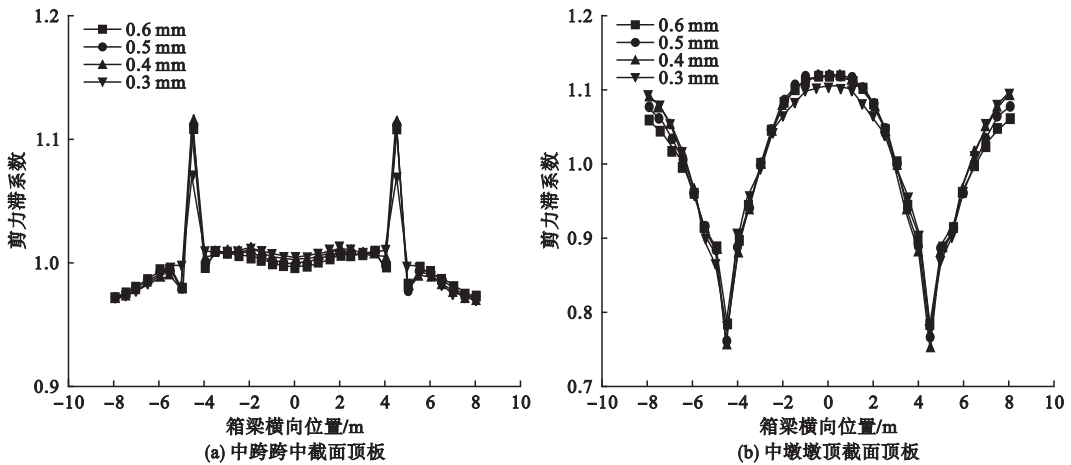


图 4 均布荷载作用下剪力滞系数

Fig. 4 Shear lag coefficients under uniform load

从图 4 可知,顶板厚度从 0.3 m 变化到 0.6 m 时,边跨跨中截面顶板均为正剪力滞效应,最大剪力滞系数分别为 1.068、1.114、1.111、1.109;中墩截面顶板均表现为负剪力滞效应,腹板处剪力滞系数分别为 0.779、0.748、0.762、0.782,剪力滞系数变化较小.说明顶板厚度对剪力滞效应影响较小.

3.1.3 宽高比

现保持截面宽度不变,通过改变截面高度来改变宽高比.假定 3 种与基本截面不同

高度的截面: +0.5 m、-0.5 m、+1 m(“+”表示相比基本截面高度增大,“-”表示相比基本截面高度减小).基本截面对比分析结果如图 5 所示.

从图 5 可知:当截面高度分别为“-0.5 m”、基本截面、“+0.5 m”、“+1 m”时,均布荷载作用下边跨跨中截面顶板均表现为正剪力滞效应,最大剪力滞系数分别为 1.067、1.068、1.074、1.081;底板均表现为负剪力滞效应,最大剪力滞系数分别为 1.144、

1.132、1.127、1.122,剪力滞系数变化较小.可以看出,宽高比对翼板剪力滞效应影响很小.

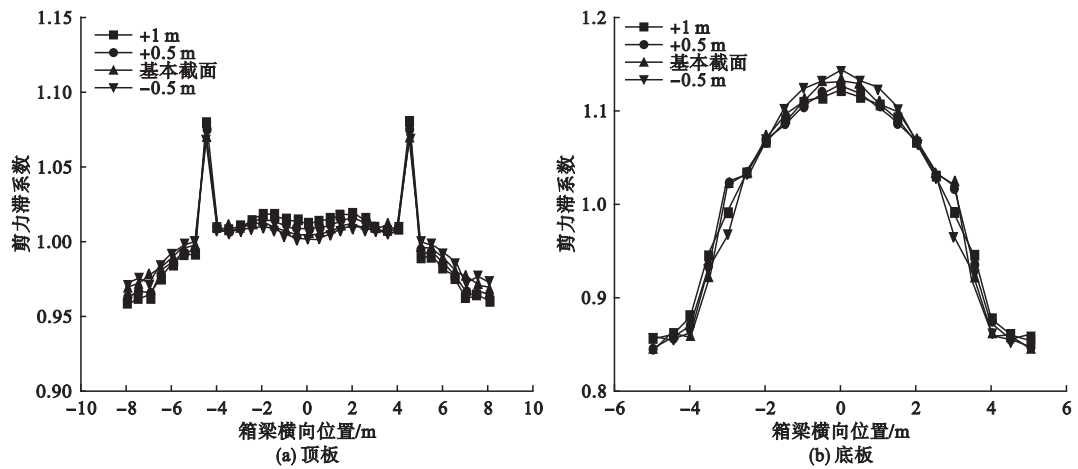


图5 均布荷载作用下边跨跨中截面剪力滞系数

Fig. 5 Shear lag coefficients in mid-span cross-section of side span under uniform loads

3.1.4 宽跨比

保持跨径不变,通过改变箱室内翼缘宽度来改变宽跨比.现分别设顶板宽度 $B=12\text{ m}$ 、 14 m 、 16 m 、 18 m ,宽跨比 B/L 从 0.1 变化至 0.15 ,考虑 4 种不同的宽跨比,分析集中与均布荷载作用下顶、底板剪力滞系数变化规律,分析结果如图6所示.

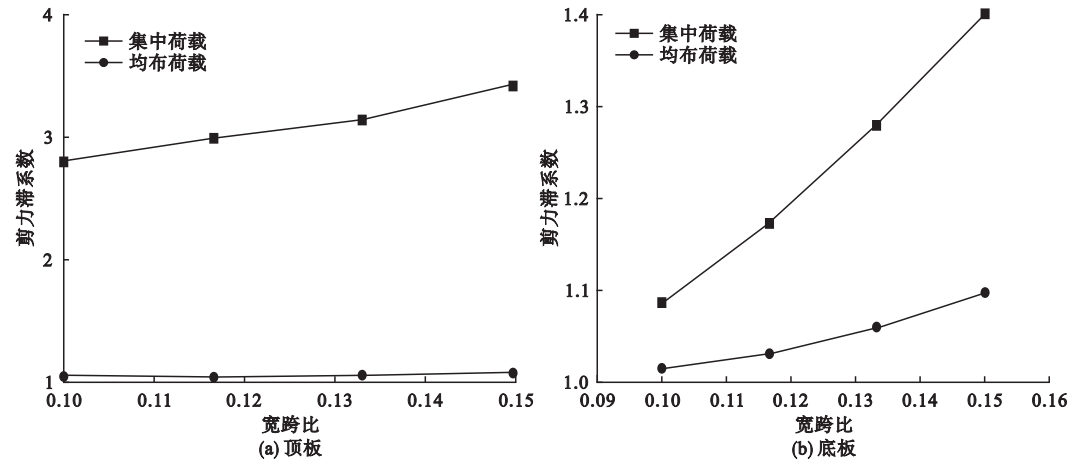


图6 均布与集中荷载作用下中跨跨中截面最大剪滞系数随 B/L 的变化

Fig. 6 Variations of maximum shear lag coefficients in mid-span cross-section of middle span with B/L under uniform load or concentrated load

由图6(a)可知:随着顶板宽度从 12 m 变化至 18 m ,均布荷载作用下跨中截面顶板最大剪力滞系数从 1.041 变化至 1.067 ,集中荷载作用下跨中截面顶板最大剪力滞系数从 2.798 变化至 3.439 .由图6(b)可知:随着顶板宽度从 12 m 变化至 18 m ,均布荷载作用下跨中截面底板最大剪力滞系数从 1.014 变化至 1.097 ,集中荷载作用下跨中截面底板最大剪力滞系数从 1.087 变化至 1.400 ,说明宽高比对均布荷载用下顶、底板剪力滞系数影响较小,对集中荷载作用下顶、底板剪力滞系数影响较大.

3.2 荷载类型对剪力滞效应的影响

采用均布荷载或集中荷载分别独立作用得到控制截面剪力滞系数,对比分析结果如图7、图8所示.

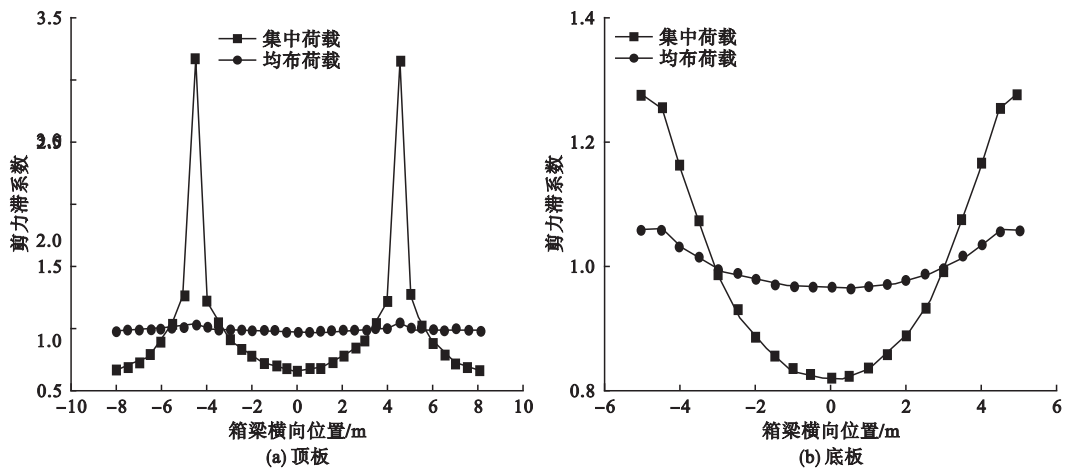


图7 不同荷载类型下中跨跨中截面剪力滞系数

Fig. 7 Shear lag coefficients in mid-span cross-section of middle span under different load types

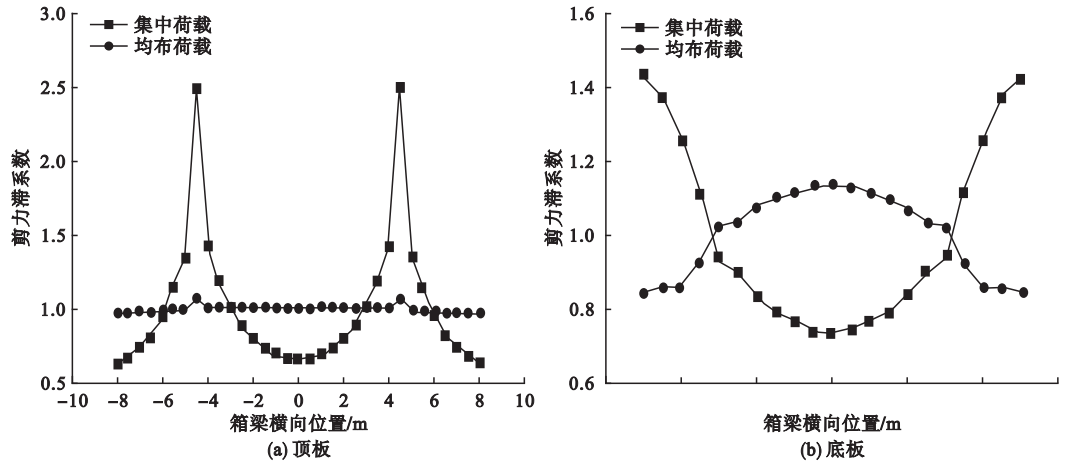


图8 不同荷载类型下边跨跨中截面剪力滞系数

Fig. 8 Shear lag coefficients in mid-span cross-section of side span under different load types

从图7与图8可以看出,无论集中荷载还是均布荷载,中跨跨中截面顶底板均表现为正剪力滞效应,且集中荷载作用下剪力滞效应更加明显;对于边跨跨中截面,集中荷载作用下顶底板均表现为正剪力滞效应,而在均布荷载作用下,顶板表现为正剪力滞效应,底板却表现为明显的负剪力滞效应.说明不同荷载作用类型对于剪力滞效应影响较大.

4 基于敏感参数的数据回归分析

通过空间有限元方法对大跨度变截面波形钢腹板组合箱梁的参数敏感性分析,发现箱梁多个几何参数中宽跨比是影响剪力滞效

应的主要因素,其他参数如腹板厚度、顶板厚度、宽高比等对翼板剪力滞系数的影响较小,在随后建立经验公式时没有考虑这些因素.

对集中与均布荷载作用下中跨跨中截面顶底板剪力滞效应的分析结果表明,顶底板均表现为正剪力滞效应,且集中荷载作用下翼板的剪力滞效应大于均布荷载作用下的剪力滞效应.为简化计算并偏于安全考虑,在建立经验公式时可只考虑集中荷载作用.

建立宽跨比(B/L)与有效宽度比 ϕ (翼缘有效分布宽度与翼缘实际宽度的比值)关系,笔者采用二次多项式数据回归,回归曲线如图9所示.建立集中荷载作用下中跨跨中

截面翼板有效宽度比计算的经验公式为

顶板:
$$\phi = -3.3149(B/L)^2 - 0.4687 \times (B/L) + 0.4365,$$

底板:
$$\phi = -0.937(B/L)^2 - 3.8898(B/L) + 1.3187.$$

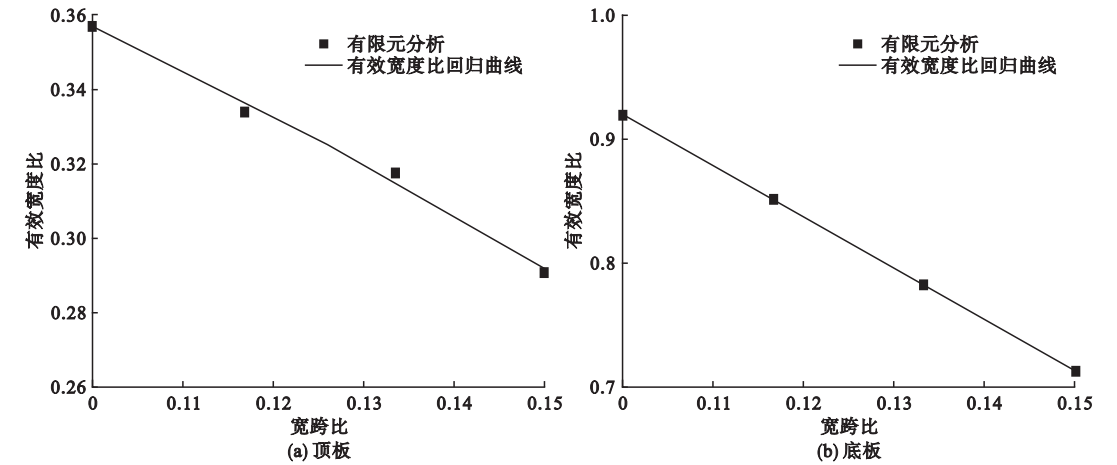


图9 集中荷载作用下有效宽度比随B/L的变化

Fig. 9 Variations of effective flange width ratio with B/L under concentrated load

5 结 论

- (1)不同荷载作用类型对截面剪力滞效应影响较大。
- (2)宽跨比是影响箱梁剪力滞效应的主要几何参数,其他参数如腹板厚度、顶板厚度、宽高比等对翼板剪力滞效应影响很小。
- (3)利用数据回归分析,总结出了集中荷载作用下波形钢腹板组合箱梁翼缘有效分布宽度计算的经验公式。

参考文献

[1] 朱世峰,舒志云,李成君. 波形钢腹板 PC 组合箱梁剪力滞效应影响因素分析[J]. 公路工程,2014,39(3):267-270.
(ZHU Shifeng, SHU Zhiyun, LI Chengjun. Impact factor research on shear lag effect of PC composite box-girder with corrugated steel web [J]. Highway engineering, 2014, 39(3): 267-270.)

[2] 舒志云. 波形钢腹板 PC 组合箱梁剪力滞效应[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.
(SHU Zhiyun. Corrugated steel web PC composite box beam shear lag effect [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.)

[3] 杨彦海,周俊威,李俊,等. 波形钢腹板 PC 组

合箱梁剪力滞效应分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2013(8):134-137.
(YANG Yanhai, ZHOU Junwei, LI Jun, et al. Shear lag effect analysis of PC composite box-girder with corrugated steel web[J]. Journal of highway and transportation research and development (applied technology edition), 2013 (8):134-137.)

[4] 柴永飞. 波形钢腹板组合箱梁翼板有效分布宽度取值问题的理论研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2014.
(CHAI Yongfei. The theoretical research value corrugated steel webs of the effective flange width[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.)

[5] 李光玲. 大跨径变截面单箱三室波纹钢腹板组合连续箱梁桥剪力滞效应研究[D]. 西安:长安大学,2014.
(LI Guangling. Research on shear lag effect of three cells single box girder in long-span variable cross-section continuous beam bridge with corrugated steel web[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.)

[6] 肖立江. 荷载横向变位对波形钢腹板箱梁剪力滞效应的影响[J]. 兰州工业学院学报, 2016, 23(1): 25-30.
(XIAO Lijiang. Shear lag effect of the different lateral loading position of box girder with corrugated steel web[J]. Journal of Lanzhou institute of technology, 2016, 23(1): 25-30.)

[7] 刘勇,张丽,张元海,等. 单箱双室箱梁剪力滞

- 效应的差分解[J]. 兰州交通大学学报, 2012, 31(3): 31–34.
(LIU Yong, ZHANG Li, ZHANG Yuanhai, et al. Difference solution for shear lag effect of twin-cell box girder[J]. Journal of Lanzhou jiaotong university, 2012, 31(3): 31–34.)
- [8] CHEN S S, TIAN Z L, GUI S R. Shear lag effect of a single-box multi-cell girder with corrugated steel webs[J]. Journal of highway & transportation research & development, 2016, 10(1): 33–40.
- [9] 向宇. 比拟杆法分析波形钢腹板箱梁桥剪力滞效应[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
(XIANG Yu. The bar simulation method of shear lag effect in the composite box girder with corrugated steel web[D]. Changsha: Hunan University, 2011.)
- [10] 李丽园. 波形钢腹板组合连续箱梁剪力滞效应的理论与试验研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2012.
(LI Liyuan. The theoretical and experimental research on shear-lag effect in the continuous box-girder with corrugated steel webs[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2012.)
- [11] 孙强. 波纹钢腹板组合箱梁剪力滞效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
(SUN Qiang. Research on shear lag effect in combined box-girder with corrugated steel webs[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.)
- [12] 马磊, 周林云, 万水. 单箱三室波形钢腹板箱梁剪力滞效应研究[J]. 中外公路, 2013, 33(3): 95–99.
(MA Lei, ZHOU Linyun, WAN Shui. Research on shear lag effect of 3-cell single box-girder with corrugated steel web[J]. Journal of China & foreign highway, 2013, 33(3): 95–99.)
- [13] 袁道云. 单箱双室波形钢腹板组合箱梁连续刚构桥剪力滞效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
(YUAN Daoyun. Research on shear lag effect of double cells single box girder in continuous rigid-frame bridge with corrugated steel webs[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.)
- [14] JIANG R J, WU Q M, XIAO Y F, et al. Study on shear lag effect of a PC box girder bridge with corrugated steel webs under self weight [C]. Applied mechanics and materials, 2014: 1092–1098.
- [15] 赵志峰, 蔺鹏臻, 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 Zhifeng, LIN Pengzhen, FANG Weibin. The bar simulation method for shear lag effect of three-cell single box girder[J]. Journal of railway science and engineering, 2016, 13(4): 697–704.)
- [16] ZHU L, NIE J G, LI F X, et al. Simplified analysis method accounting for shear lag effect of steel-concrete composite decks[J]. Journal of constructional steel research, 2015, 115(7): 62–80.
- [17] 周勇超, 郝宪武, 李子青. 变截面波形钢腹板组合梁剪力滞效应[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(4): 62–69.
(ZHOU Yongchao, HAO Xianwu, LI Ziqing. Shear lag effect of non-uniform composite beam with corrugated steel web[J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2014, 34(4): 62–69.)
- [18] 张亚兴, 任大龙, 李文虎. 波形钢腹板 PC 连续组合梁剪力滞效应研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(3): 55–60.
(ZHANG Yaxing, REN Dalong, LI Wenhui. Shear lag effect analysis of continuous girder with corrugated steel webs[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2015, 37(3): 55–60.)
- [19] 华正阳, 赵英策, 孔庆凯, 等. 大跨变截面波形钢腹板 PC 组合箱梁剪力滞效应及偏载效应研究[J]. 公路, 2014(8): 249–254.
(HUA Zhengyang, ZHAO Yingce, KONG Qingkai, et al. Research on shear lag effect and partial load effect of long span box girder with corrugated steel web and variable cross-section [J]. Highway, 2014(8): 249–254.)
- [20] SHU X J, ZHONG X G, LI Z X, et al. Experimental study on shear lag of box girder with variable depth under varying lateral position concentric loads[J]. Applied mechanics & materials, 2014, 501/504: 993–999.