

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.02.010

大跨波形钢腹板连续箱梁桥有效分布宽度研究

刘旭政¹, 程 坤^{1,2}, 吴 刚¹, 荆伟伟³

(1. 华东交通大学 土木建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 湖北交投智能检测股份有限公司, 湖北 武汉 430051;
3. 嘉善县交通运输局, 浙江 嘉兴 314100)

摘要: 波形钢腹板组合箱梁桥与钢筋混凝土箱梁桥一样, 箱梁翼板也存在剪力滞效应。为研究大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁的剪力滞效应, 采用 ANSYS 的 APDL 参数化建模方法建立了典型的三跨式波形钢腹板组合连续箱梁桥的有限元模型, 计算分析了集中(均布)荷载作用下变截面箱梁几何参数(腹板尺寸、宽高比、宽跨比、变截面)对于剪力滞系数的影响规律, 明确了影响大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁桥剪力滞效应的主要影响因素以及剪力滞效应影响范围, 最后采用修正荷载计算得出了基于规范的有效分布宽度的修正系数。结果表明: 宽跨比是影响变截面波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应的主要因素, 宽高比、腹板尺寸对箱梁的剪力滞效应影响较小; 等截面连续箱梁与变截面连续箱梁的剪力滞效应存在较大差异, 集中荷载作用下, 等截面箱梁顶板剪力滞系数大于变截面箱梁, 底板剪力滞系数小于变截面箱梁; 集中荷载作用下对箱梁剪力滞的纵向影响范围十分有限, 仅限加载处及附近截面; 集中荷载作用下中跨跨中截面及中墩墩顶截面的有效分布宽度修正系数取 0.65, 边跨跨中截面及边墩墩顶截面有效分布宽度修正系数取 0.5。

关键词: 桥梁工程; 剪力滞系数; 荷载修正; 波形钢腹板组合箱梁; 有效分布宽度

中图分类号: U442

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2022) 02-0085-08

Study on Effective Distribution Width of Long-span Continuous Girder Bridge with Corrugated Steel Webs

LIU Xu-zheng¹, CHENG Kun^{1,2}, WU Gang¹, JING Wei-wei³

(1. School of Civil Engineer and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China;
2. Hubei Transport Investment Intelligent Inspection Co., Ltd., Wuhan Hubei 430051, China;
3. Jiashan County Transport Bureau, Jiaxing Zhejiang 314100, China)

Abstract: Like RC box girder bridge, the flanges of composite box girder bridge with corrugated steel webs have shear lag effect. In order to study the shear lag effect of long-span variable composite continuous beam bridge with corrugated steel webs, the finite element model of a typical 3-span composite continuous box girder bridge with corrugated steel webs is established by using the APDL parametric modeling method of ANSYS software. The influence of the geometric parameters (web size, width-height ratio, width-span ratio, and variable cross-section) of variable cross-sectional box girder on the shear lag coefficient under concentrated (uniformly distributed) loads is calculated and analyzed. The primary influencing factors and influence range of the shear lag effect are determined. Finally, the correction coefficient of effective distribution width based on specification is calculated by using modified load. The result shows that (1) Width-span ratio is the primary influencing factor of the shear lag effect of variable cross-sectional composite continuous girder with corrugated steel webs, width-height ratio and web size have little influence on the shear

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52068026, 52068025); 浙江省交通运输厅科技计划项目 (2021034)

作者简介: 刘旭政 (1980-), 男, 江西吉安人, 博士, 副教授. (urbwolf@126.com)

lag effect of box girder. (2) There is a big difference in the shear lag effect between constant sectional continuous box girder and variable sectional continuous box girder. Under concentrated load, the shear lag coefficient of the top slab of the constant sectional box girder is larger than that of the variable sectional box girder, while the shear lag coefficient of the bottom slab of the constant sectional box girder is smaller than that of variable sectional box girder. (3) The influence range on the shear lag effect of box girder is very limited under concentrated load, only the loading location and adjacent sections can be affected. (4) Under concentrated load, the corrected factor of effective distribution width of central span mid-span section and central pier top section is 0.65, and that of side span mid-span section and side pier top section is 0.5.

Key words: bridge engineering; shear lag coefficient; load correction; composite box-girder with corrugated steel webs; effective distribution width

0 引言

近年来随着我国大力推进钢结构桥梁建设,波形钢腹板组合箱梁桥发展迅速。截止 2020 年年底我国已建成波形钢腹板组合箱梁桥近百座。与钢筋混凝土箱梁桥一样,波形钢腹板组合箱梁桥的翼板也存在剪力滞效应。目前学者普遍认为钢腹板引起的剪力滞效应较混凝土腹板严重^[1]。

对于薄壁箱梁的剪力滞效应,国内外学者已经系统地完成了相关研究,取得了大量研究成果^[2-4]。对于波形钢腹板组合箱梁的剪力滞效应,目前也有学者开展了相关研究。吴文清结合理论分析、数值模拟及模型试验,系统地研究了等截面简支波形钢腹板组合箱梁桥的剪力滞问题^[5-6];周勇超基于最小势能原理、差分法和变分法,研究推导了变截面波形钢腹板梁的剪力滞递推公式,并与工程实测结果进行对比分析^[7];陈水生采用变分法与有限元法对单箱多室波形钢组合箱梁剪力滞效应进行了对比分析^[8];马磊、万水对比分析了单箱三室波形钢腹板箱梁桥的实测数据与有限元计算结果,对其有效分布宽度进行了探讨^[9]。

国内外学者对于波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应的研究多集中在简支梁桥或者某一特定桥梁剪力滞系数的计算及测试^[10-13],对于大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁剪力滞效应研究较少涉及^[14],而相关规范对波形钢腹板组合箱梁翼缘有效宽度取值问题也未明确^[15]。本研究以某大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁为依托,系统分析了变截面箱梁几何参数对剪力滞系数的影响,并在此基础上修正了荷载作用形式,提出了基于现行规范的有效分布宽度比修正系数。

1 工程背景

大跨度连续梁桥主跨跨径最佳适用范围一般在

80~200 m 之间。表 1 列出了部分我国已建成和在建的大跨度波形钢腹板组合连续梁桥。

表 1 国内大跨度波形钢腹板组合箱梁桥
Tab. 1 Long-span composite box girder bridges with corrugated steel webs in China

序号	桥名	跨径布置/m
1	山东鄆城黄河大桥	70+11×120+70
2	桃花峪黄河大桥跨大堤桥	75+135+75
3	河南英峪沟 2 号桥	23+65+23
4	河南卫河大桥	47+52+47
5	深圳南山大桥	80+130+80
6	邢台紫金大桥	88+156+88
7	江西富山赣江特大桥	69+4×120+69

本研究以富山赣江大桥为依托工程^[16],该桥分跨为 69 m+4×120 m+69 m,主梁为单箱单室箱梁波形钢腹板组合箱梁。中跨墩顶处梁高 7.2 m,跨中梁高为 3.5 m。顶板宽 16 m,底板宽 10 m,翼缘板悬臂长 3 m。组合箱梁结构尺寸如图 1 所示。主梁采用 C55 混凝土,波形钢腹板采用 1600 型波形钢板,钢材采用 18 mm 厚 Q345C 级合成钢板。

2 分析方法

2.1 有限元模型的建立

由于连续跨数量对于箱梁剪力滞效应无直接影响,本研究以典型的三跨式连续箱梁来计算分析其剪力滞效应。采用 ANSYS 的 APDL 参数化建模方法建立了 (69+120+69) m 有限元模型,截面尺寸采用富山赣江大桥实桥数据。混凝土顶、底板均采用 8 节 SOLID45 固体单元模拟,波形钢腹板采用 4 节点 SHELL63 弹性壳单元模拟。变截面变厚度底板通过“以直代曲”逐段循环建立。波形钢腹板箱梁桥的 ANSYS 局部模型见图 2。

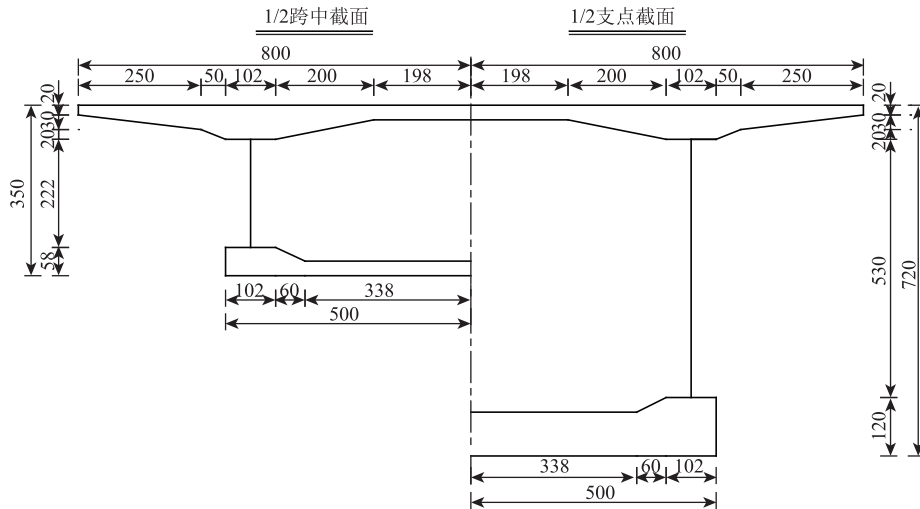


图1 富山赣江大桥典型截面示意图(单位: cm)

Fig.1 Schematic diagram of typical section of Fushan Ganjiang Bridge (unit: cm)



图2 ANSYS局部模型图

Fig.2 Diagram of ANSYS partial model

2.2 剪力滞效应的分析方法

采用以下方法计算其剪力滞系数:提取箱梁上、下翼缘板若干个点(每0.5 m设1个数据提取点)的有限元计算出的正应力大小,并求出翼缘板的平均正应力;将上、下翼缘板各点的正应力除以其对应的翼缘板平均正应力,即可得出剪力滞系数。同时采用有效宽度比来考虑波形钢腹板组合箱梁的剪力滞效应。

有效宽度比的定义及计算见式(1)~(3):

最大剪力滞系数:

$$\lambda_{\max} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_0} \quad (1)$$

翼缘有效宽度比:

$$\phi = \frac{b_e}{b} \quad (2)$$

翼缘有效宽度:

$$b_e = \frac{\int_b \sigma dz}{\sigma_{\max}} \quad (3)$$

式中, $\sigma_{\max}$ 为翼缘最大正应力; σ_0 为翼缘平均正应力; b 为翼缘的实际宽度; b_e 为翼缘有效宽度。

3 剪力滞效应影响因素分析

关于几何参数对剪力滞效应的影响已有较多研

究,除了常规的高宽比、宽跨比、腹板规格(厚度、波高等)的影响,对于变截面的波形钢腹板组合箱梁,主梁高度变化的影响也需要进行分析。计算荷载按一个设计车道布置,集中(均布)荷载横向对称布置于两腹板处。以下各图计算结果以翼缘板中心为坐标原点,箱梁横向各节点位置坐标即为图中横坐标。图例中M代表中跨跨中截面,S代表边跨跨中截面;U代表顶板,D代表底板;P代表集中荷载,Q代表均布荷载;C代表等高截面,V代表变高截面。

3.1 腹板厚度

选取波形钢腹板常用厚度分为16,18(原截面),20 mm 3种规格对比分析剪力滞系数的大小。集中荷载P作用下的中跨跨中截面及边跨跨中截面的顶板、底板剪力滞系数如图3、图4所示。

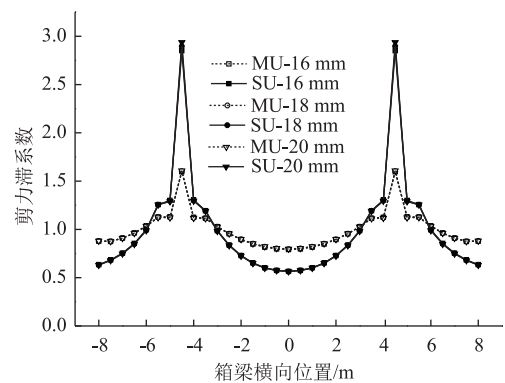


图3 P作用下不同腹板厚度的跨中顶板剪力滞系数

Fig.3 Shear lag coefficients of top slab at mid-span with different web thicknesses under P action

均布荷载作用下跨中截面的最大剪力滞系数具体数据汇总至表2。

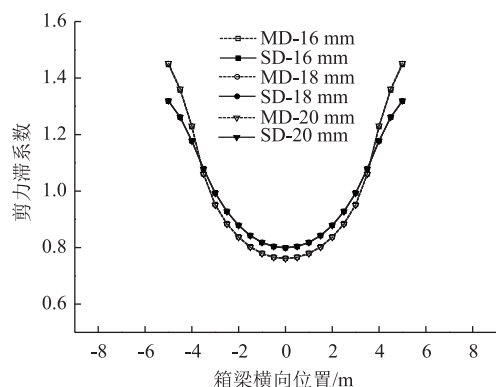


图4 P 作用下不同腹板厚度的跨中底板剪力滞系数

Fig.4 Shear lag coefficients of bottom slab at mid-span with different web thicknesses under P action

表2 均布荷载作用下跨中截面的最大剪力滞系数

Tab.2 Maximum shear lag coefficients of mid-span section under uniform load

腹板厚度/ mm	边跨跨中		中跨跨中	
	顶板	底板	顶板	底板
16	1.096	1.045	1.24	1.036
18	1.097	1.045	1.242	1.244
20	1.097	1.045	1.244	1.039

随着腹板厚度的增加,中跨及中跨跨中截面顶、底板的剪力滞系数均有所增加,但增加幅度很小,最大增幅为3%。均布荷载作用下的剪力滞系数明显小于集中荷载作用下的剪力滞系数。因此,波形钢腹板厚度对变截面组合箱梁的剪力滞效应影响很小。

3.2 腹板波高

选取波形钢腹板波高分别为0, 0.22 (原截面), 0.44 m 3种尺寸比较对比分析剪力滞系数的大小。

根据计算结果,中跨截面剪力滞效应小于边跨截面,出于篇幅考虑,本研究以下部分仅列出边跨跨中截面的剪力滞系数计算数据。集中荷载 P 作用下边跨跨中截面的剪力滞系数如图5所示,从计算结果可以看出:集中荷载作用下,边跨跨中截面顶/底板最大剪力滞系数随着腹板波高的增加均有所降低,最大降幅为6.6%。均布荷载作用下,腹板波高越高,顶板的最大剪力滞系数越小,底板的最大剪力滞系数越大,但整体变化幅度较小。总体来说,波形腹板的波高对变截面组合箱梁的剪力滞效应影响较小。

3.3 宽高比

考虑到建模的便利性,改变箱梁高度来考虑宽高比的影响。根据已建成大跨度变截面波形钢腹板

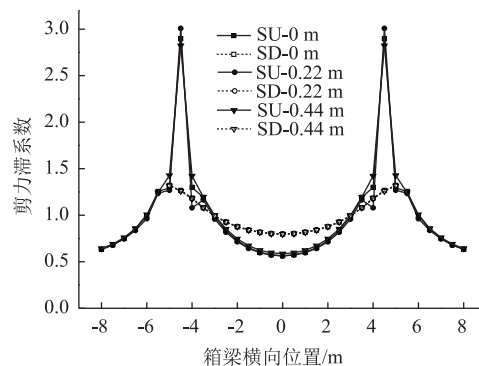


图5 P 作用下不同波高的边跨跨中顶/底板剪力滞系数

Fig.5 Shear lag coefficients of top/bottom slab at side span mid-span with different wave heights under P action

连续箱梁资料分析,连续梁跨中梁高与主墩墩顶梁高的比值均在0.4~0.67范围内。取墩顶梁高 $H_{支}=7.2$ m不变,分别取跨中梁高 $H_{中}=0.4H_{支}=2.9$ m,原箱梁高度3.5 m以及 $H_{中}=0.67H_{支}=4.8$ m,中间部分梁高按二次抛物线变化,对比分析了3种不同箱梁宽高比在集中/均布荷载作用下载面的顶、底板剪力滞系数,如图6所示。

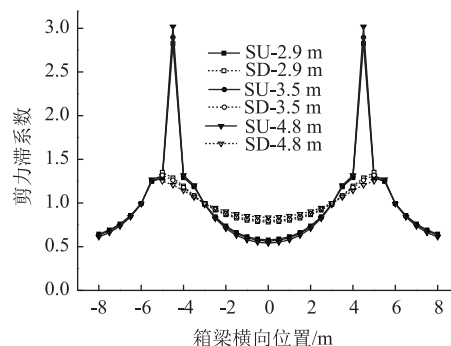


图6 P 作用下不同宽高比边跨跨中顶/底板剪力滞系数

Fig.6 Shear lag coefficients of top/bottom slab at side span mid-span with different width-height ratios under P action

集中荷载作用下,边跨跨中截面的顶板的剪力滞系数随着箱梁高度的增加有小幅增加,而底板剪力滞系数小幅减小,最大幅度为5.1%。均布荷载作用下,箱梁高宽比对剪力滞系数几乎没有影响,最大变化幅度为0.3%。总体来看,对于大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁,箱梁高宽比对剪力滞系数有一定影响,但影响较小。

3.4 宽跨比

对于薄壁箱梁,宽跨比对剪力滞效应影响较大。保持桥跨跨径不变,改变箱梁腹板间距考虑宽跨比

的影响。顶板宽度取 13, 14, 15, 16 (原截面), 17, 18 m, 对应腹板间距为 6, 7, 8, 9 (原截面), 10, 11 m。对比分析 6 种不同宽跨比在集中/均布荷载作用下截面的顶、底板剪力滞系数。

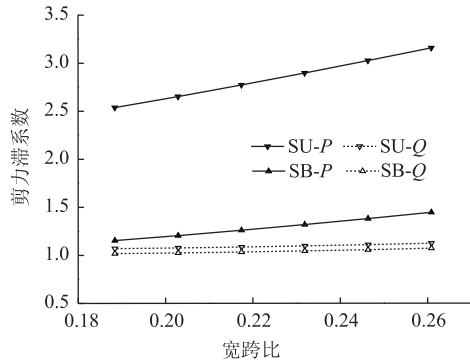


图7 不同宽跨比的边跨跨中顶/底板剪力滞系数

Fig. 7 Shear lag coefficients of top/bottom slab at side span mid-span with different width-span ratios

从图7可知:集中荷载作用下,随着边跨宽跨比的增加,边跨跨中截面顶板的剪力滞系数从 2.538 平缓增加到 3.157,底板从 1.154 平缓增加至 1.446。均布荷载作用下边跨跨中截面顶/底板剪力滞系数也有所增加,最大增幅为 5.3%。

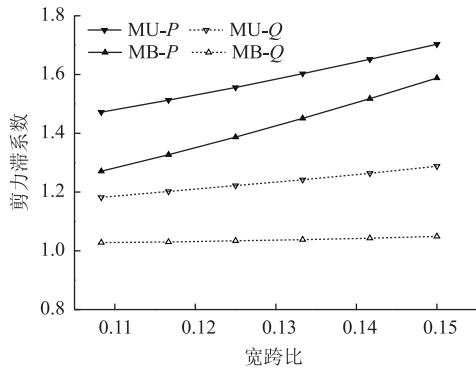


图8 不同宽跨比的中跨跨中顶/底板剪力滞系数

Fig. 8 Shear lag coefficients of top/bottom slab at central span mid-span with different width-span ratios

从图8可知:集中荷载作用下,随着中跨宽跨比的增加,中跨跨中截面顶板的剪力滞系数从 1.472 平缓增加到 1.703,底板从 1.271 平缓增加到 1.588;均布荷载作用下中跨跨中截面顶/底板剪力滞系数也有所增加,最大增幅为 9%。对于大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁,宽跨比对剪力滞效应影响较大。在集中(均布)荷载作用下,跨中截面的顶板剪力滞系数大于底板剪力滞系数。

3.5 变截面

建立同跨径等截面波形钢腹板组合连续箱梁有限元模型与原变截面模型进行对比分析,荷载类型与加载方式均不变,比较分析集中荷载作用下边跨跨中截面顶/底板剪力滞系数如图9所示。

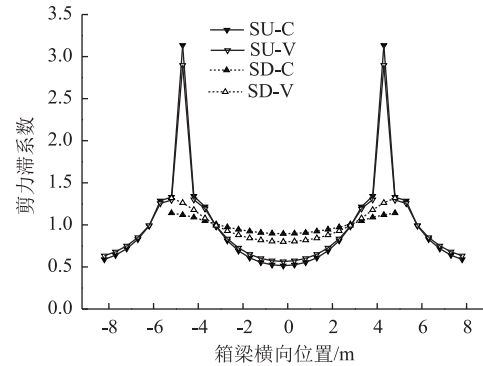


图9 P作用下边跨跨中顶/底板剪力滞系数

Fig. 9 Shear lag coefficients of top/bottom slab at side span mid-span under P action

从图9可知,集中荷载作用下,等截面连续梁边跨跨中截面顶板的剪力滞系数大于变截面连续梁桥 7.6%,底板剪力滞系数小于变截面连续梁桥 15.5%。从计算结果可知:集中荷载作用下,等截面箱梁顶板的剪力滞系数大于变截面箱梁,等截面箱梁底板的剪力滞系数小于变截面箱梁。等截面连续箱梁与变截面连续箱梁的剪力滞效应存在较大差异。

3.6 剪力滞效应顺桥向影响范围分析

为了分析剪力滞效应顺桥向影响范围,将集中荷载作用在中跨跨中截面(纵坐标位置为 129 m),荷载作用位置两侧沿顺桥向每隔 0.2 m 提取截面剪力滞系数,得到集中荷载作用下各分析截面剪力滞系数分布规律如图10所示。

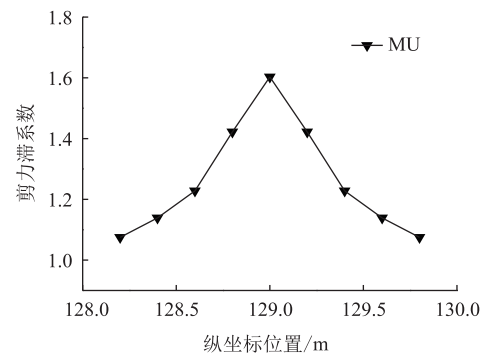


图10 P作用下附近位置的顶板剪力滞系数

Fig. 10 Shear lag coefficients of top slab at adjacent sections under P action

集中荷载作用在中跨跨中截面时,剪力滞效应在2 m范围内迅速减小,从加载截面的2.896减小到距加载截面0.8 m的1.075,其影响范围十分有限,仅限加载处及附近截面。

4 翼缘有效分布宽度分析

对于大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁,宽跨比是影响剪力滞效应的主要参数,其他次要参数对翼板的剪力滞效应影响均较小,故在随后探讨翼缘有效分布宽度取值时没有考虑这些非主要因素。

4.1 面荷载对剪力滞大小的影响

根据上述计算结果,集中荷载作用下剪力滞效应更明显,但影响范围十分有限。实际车轮荷载是经过铺装层扩散后以面荷载的形式作用于桥面板的,采用集中荷载计算翼缘有效分布宽度将显得过于保守,影响结构设计经济性。轮胎与桥面的接触面按规范推荐 $a_2 \times b_2 = 0.2 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 计,假定铺装层厚度 H 为0.1 m,将集中荷载修正为 $a_1 \times b_1 = 0.4 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ (a_1 为顺桥向尺寸, b_1 为横桥向尺寸)的面荷载计算剪力滞系数。分别计算集中荷载、面荷载在中跨不同位置的剪力滞系数,计算模型采用原结构模型,计算出各截面顶板的剪力滞系数如表3所示。

表3 修正荷载前后截面顶板剪力滞系数对比

Tab. 3 Comparison of shear lag coefficients of top slab of sections before and after load correction

截面位置	剪力滞系数	
	修正前	修正后
墩顶	4.213	2.278
1/4跨径	2.977	1.936
跨中	1.606	1.328

根据计算结果可知,修正前后剪力滞系数变化明显,故可采用修正后面荷载来计算翼缘有效分布宽度。

4.2 有效分布宽度取值研究

将面荷载作用在跨中截面、中墩墩顶截面,同样以加载处截面为分析截面,从分析截面提取结果。与前面一样,分别取腹板间距为6,7,8,9(原截面),10,11 m,(根据相关资料,现有大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁宽跨比基本涵盖在此范围内)。为了与现有规范进行比较分析,按宽跨比 b_i/l_i 计算分析中跨跨中截面、边跨跨中截面、中墩墩顶截面、边墩墩顶截面的有效宽度比,分析在实际车轮面荷载作用下关键截面的有效宽度比变化规律。

从图11可知,随着宽跨比从0.04变化至0.076,集中荷载作用下的中跨跨中顶板有效宽度比从0.847逐渐减小到0.692,底板有效宽度比从0.779逐渐减小到0.624;均布荷载作用下的中跨跨中顶板有效宽度比从0.846逐渐减小到0.776,底板有效宽度比从0.973逐渐减小到0.953。

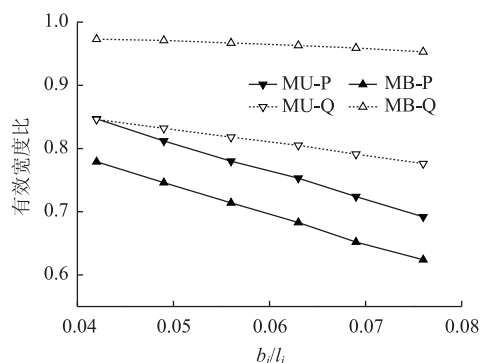


图11 面荷载作用下中跨跨中截面顶/底板有效宽度比随宽跨比变化

Fig. 11 Effective width ratios of top/bottom slab at central span mid-span section under plane loads varying with width-span ratio

从图12计算结果可知,随着宽跨比从0.054变化至0.1,集中荷载作用下的边跨跨中顶板有效宽度比从0.641逐渐减小到0.457,底板有效宽度比从0.86逐渐减小到0.685;均布荷载作用下的边跨跨中顶板有效宽度比从0.935逐渐减小到0.89,底板有效宽度比从0.982逐渐减小到0.933。

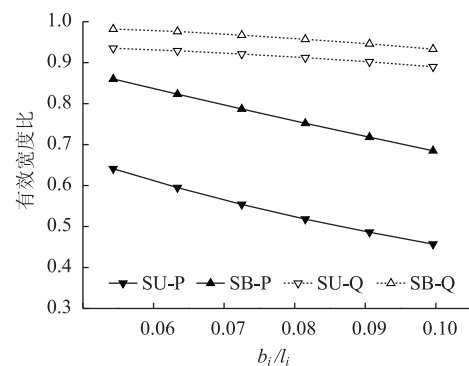


图12 面荷载作用下边跨跨中截面顶/底板有效宽度比随宽跨比变化

Fig. 12 Effective width ratios of top/bottom slab at side span mid-span section under plane loads varying with width-span ratio

4.3 有效分布宽度修正系数

现行的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)^[17](以下简称《公路

桥涵混规》)以及《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[18](以下简称《公路钢桥规范》)均给出了箱形截面梁翼缘有效宽度比计算公式。将本研究计算分析结果与规范规定值进行对比,由此提出基于规范的波形钢腹板组合箱梁翼缘有效分布宽度计算的修正系数,修正系数按《公路桥涵混规》考虑,分析结果如表4所示。应当注意的是,规范中提出的有效分布宽度是在设计组合效应下的有效分布宽度,而本研究给出的是单一荷载形式下的有效分布宽度。均布荷载作用下的有效宽度比修正方法同集中荷载,限于篇幅,本研究未给出详细数据。

表4 面荷载作用下的大跨度变截面波形钢腹板的有效宽度比

Tab. 4 Effective width ratios of long-span variable sectional corrugated steel webs under plane loads

	b_i/l_i	0.042	0.049	0.056	0.063	0.069	0.076
	混规	1	1	0.991	0.978	0.966	0.954
中跨跨	钢规	1	1	0.989	0.975	0.961	0.947
中截面	顶板	0.847	0.812	0.78	0.753	0.724	0.692
	底板	0.779	0.746	0.714	0.683	0.652	0.624
	修正系数	0.779	0.746	0.720	0.698	0.675	0.654
	b_i/l_i	0.054	0.063	0.073	0.082	0.091	0.100
	混规	0.993	0.978	0.960	0.943	0.927	0.910
边跨跨	钢规	0.992	0.974	0.954	0.936	0.918	0.900
中截面	顶板	0.641	0.595	0.554	0.518	0.486	0.457
	底板	0.860	0.823	0.787	0.752	0.718	0.685
	修正系数	0.645	0.609	0.577	0.549	0.524	0.502
	b_i/l_i	0.079	0.093	0.106	0.119	0.132	0.146
	混规	0.800	0.740	0.691	0.646	0.605	0.566
中墩墩	钢规	0.835	0.801	0.771	0.743	0.716	0.689
顶截面	顶板	0.556	0.505	0.474	0.443	0.422	0.401
	底板	0.695	0.637	0.585	0.540	0.501	0.466
	修正系数	0.66	0.682	0.686	0.686	0.698	0.709
	b_i/l_i	0.054	0.063	0.073	0.082	0.091	0.100
	混规	0.922	0.875	0.827	0.786	0.748	0.713
边墩墩	钢规	0.992	0.974	0.954	0.936	0.918	0.900
顶截面	顶板	0.520	0.472	0.438	0.411	0.390	0.369
	底板	0.621	0.562	0.513	0.468	0.429	0.396
	修正系数	0.564	0.539	0.530	0.523	0.521	0.518

根据计算结果可知:在跨中位置,《公路桥涵混规》的有效宽度比的计算结果大于《公路钢桥规范》;而在墩顶位置,《公路桥涵混规》的有效宽度比的计算结果小于《公路钢桥规范》。大跨度变截面

波形钢腹板组合连续箱梁在修正荷载作用下的有效分布宽度均小于规范值。中跨跨中截面及中墩墩顶截面的有效分布宽度修正系数取0.65,边跨跨中截面及边墩墩顶截面有效分布宽度系数取0.5。同时,根据结构宽跨的具体大小可参照表格适当调整修正系数。

5 结论

基于空间有限元分析软件ANSYS,分析了大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁的剪力滞效应的影响因素,并给出了基于现行规范的有效宽度比修正系数。

(1) 宽跨比是影响变截面波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应的主要因素,其他次要参数(宽高比、腹板尺寸等)对箱梁的剪力滞效应影响均较小。

(2) 等截面连续箱梁与变截面连续箱梁的剪力滞效应存在较大差异。集中荷载作用下,等截面箱梁顶板的剪力滞系数大于变截面箱梁,等截面箱梁底板的剪力滞系数小于变截面箱梁。

(3) 集中荷载作用下对箱梁剪力滞的纵向影响范围十分有限,仅限加载处及附近截面。

(4) 集中荷载作用下,中跨跨中截面及中墩墩顶截面的有效分布宽度修正系数取0.65,边跨跨中截面及边墩墩顶截面取0.5。

参考文献:

References:

- [1] IBRAHIM S A, EL-DAKHAKHNI W W, ELGAALY M. Fatigue of Corrugated Web Plate Girder: Analytical Study [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132 (9): 1381-1392.
- [2] CHANG S T. Prestress Influence on Shear-lag Effect in Continuous Box-girder Bridge [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118 (11): 3113-3121.
- [3] 郭金琼,房贞政,罗孝登.箱形梁桥剪滞效应分析[J].土木工程学报,1983,16(1):1-13.
GUO Jin-qiong, FANG Zhen-zheng, LUO Xiao-deng. Analysis of Shear Lag Effect in Box Girder Bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 1983, 16 (1): 1-13.
- [4] MALCOLM D J, REDWOOD R G. Shear Lag in Stiffened Box Girders [J]. Journal of Structural Division, 1970, 96 (7): 1403-1415.
- [5] 吴文清.波形钢腹板组合箱梁剪力滞效应问题研究[D].南京:东南大学,2002.
WU Wen-qing. Research on Shear-lag Effect in Composite

- Box-girder with Corrugated Steel Webs [D]. Nanjing: Southeast University, 2002.
- [6] 吴文清, 叶见曙, 万水, 等. 波形钢腹板组合箱梁在对称加载作用下剪力滞效应的试验研究 [J]. 中国公路学报, 2003, 16 (2): 48-51.
- WU Wen-qing, YE Jian-shu, WAN Shui, et al. Experiment Study of Shear Lag Effect of Composite Box Girder with Corrugated Steel Web under the Symmetrical Load [J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16 (2): 48-51.
- [7] 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 Yong-chao, HAO Xian-wu, LI Zi-qing. 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.
- [8] 陈水生, 田正龙, 桂水荣. 单箱多室波形钢腹板箱梁剪力滞研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (7): 69-75.
- CHEN Shui-sheng, TIAN Zheng-long, GUI Shui-rong. Research on Shear Lag of Single-box Multi-cell Girder with Corrugated Steel Webs [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (7): 69-75.
- [9] 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 Lin-yun, WAN Shui. Research on Shear Lag Effect of Single-box Three-cell Box Girder with Corrugated Steel Webs [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33 (3): 95-99.
- [10] ZHOU M, ZHANG J D, ZHONG J T, et al. Shear Stress Calculation and Distribution in Variable Cross Sections of Box Girders with Corrugated Steel Webs [J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142 (6): 04016022.
- [11] 刘旭政, 程坤, 陈晔, 等. 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 [J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2017, 33 (5): 855-862.
- LIU Xu-zheng, CHENG Kun, CHEN Ye, et al. Shear Lag Effect of Long Span Composite Continuous Box-girder Bridge with Corrugated Steel Webs and Variable Cross-section [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition), 2017, 33 (5): 855-862.
- [12] 陈玉龙, 刘世忠. 单箱双室变厚翼板 CSW 简支箱梁剪滞剪切效应 [J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (10): 2640-2650.
- CHEN Yu-long, LIU Shi-zhong. Shear Lag Shear Effect of Single-box and Double-cell Thickened Wing Plate CSW Simply Supported Box Girder [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18 (10): 2640-2650.
- [13] 许世展, 冯冠杰, 陈淮. 波形钢腹板多室箱梁部分斜拉桥剪力滞效应分析 [J]. 世界桥梁, 2019, 47 (6): 58-64.
- XU Shi-zhan, FENG Guan-jie, CHEN Huai. Analysis of Shear Lag Effect in Extradosed Bridge with Multi-cell Box Girder and Corrugated Steel Webs [J]. World Bridges, 2019, 47 (6): 58-64.
- [14] 任蕊. 波形钢腹板 PC 箱梁剪力滞效应数值分析研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- REN Rui. Study of Numerical Analysis on Effect of Shear Lag for PC Box Girder with Corrugated Steel Webs [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [15] CJJ/T 272—2017, 波形钢腹板组合梁桥技术标准 [S].
- CJJ/T 272—2017, Technical Standard for Composite Girder Bridges with Corrugated Steel Webs [S].
- [16] 陈水生, 付仂, 桂水荣. 富山赣江特大桥车桥耦合振动响应及冲击系数研究 [J]. 华东交通大学学报, 2018, 35 (5): 27-34.
- CHEN Shui-sheng, FU Le, GUI Shui-rong. Study on Vehicle-bridge Coupled Vibration Response and Impact Coefficient for the Ganjiang Bridge in Fushan [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35 (5): 27-34.
- [17] JTG 3362—2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].
- JTG 3362—2018, Specifications for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts [S].
- [18] JTG D64—2015, 公路钢结构桥梁设计规范 [S].
- JTG D64—2015, Specifications for Design of Highway Steel Bridge [S].