

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.02.047

大跨闭口钢箱组合梁组合桥面板有效宽度研究

陈科旭

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:为研究大跨度闭口组合钢箱梁组合桥面板的有效宽度系数变化规律,依托G1503高速公路跨吴淞江大桥建立了组合连续钢箱梁桥有限元模型,分析了不同桥梁跨度、不同箱室宽度下的跨中截面和中支点截面有效宽度系数变化规律,对比了钢桥面板和混凝土桥面板有效宽度的差异,给出了混凝土桥面板有效宽度系数建议取值。结果表明,组合桥面板的钢桥面板和混凝土桥面板横断面应力分布规律相似。钢桥面板的有效宽度与规范规定基本相等,跨中断面小约0.41%,支点断面小约4.13%;混凝土桥面板的有效宽度与规范规定差异较大,跨中断面小约3.25%,支点断面小约27.9%。组合桥面板的钢桥面板有效宽度比混凝土桥面板有效宽度大,跨中断面相差0.51%,支点断面相差5.9%,混凝土桥面板有效宽度系数可参考钢桥面板有效宽度系数折减0.9倍取值。

关键词:大跨度;闭口钢箱组合梁;组合桥面板;有效宽度

中图分类号:U443.31

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)02-0214-06

0 引言

钢梁与混凝土面板结合而成的箱型组合梁因抗扭能力强、整体性能好、适合曲线线形,更适应大跨与特殊要求等特点,获得了较大发展。与混凝土梁一样,组合箱梁桥的钢桥面板和混凝土桥面板也都存在剪力滞效应。

对于箱梁剪力滞效应,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。刘旭政等^[1]通过参数化建模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和影响范围,并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。赵虎等^[2]采用空间网格分析方法探讨分析波形钢腹板矮塔斜拉桥的剪力滞效应。程坤^[3]以国内在建大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁为依托,采用有限元法系统分析了不同工况荷载作用下几何参数对剪力滞效应的影响。谢上飞^[4]在选定的剪力滞翘曲位移函数的基础上,基于能量变分法推导得到了钢-超高性能混凝土(UHPC)组合梁剪力滞控制微分方程及相应边界条件。文献[5]研究了组合钢箱梁剪力滞效应。冯秋然和邵真宝等^[6-7]对钢板组合梁剪力滞效应进行了研究。陈雨阳等^[8]基于通用有限元分析软件ANSYS计算了波形钢腹板连续箱梁桥各关键截面的剪力滞系数,并与

设计所参照的混凝土连续梁桥的剪力滞效应进行了对比分析。赵屹宇^[9]研究了双箱单室曲线波形腹板钢箱-混凝土顶板组合箱梁剪力滞效应。杜铁^[10]对UHPC组合梁剪力滞效应进行了研究。齐飞祥^[11]研究了连续曲线钢-混凝土组合箱梁的剪力滞效应。

目前学者对剪力滞效应的研究集中于钢板组合梁和波形钢腹板组合梁,对闭口钢箱梁的组合桥面板剪力滞效应则研究较少。本文以G1503高速公路桥主跨138 m闭口钢箱组合梁桥为基础,系统研究了不同桥梁跨度、不同箱室宽度下组合桥面板的混凝土桥面板和钢桥面板的有效宽度系数变化规律,并进行对比,在此基础上给出了混凝土桥面板有效宽度系数折减建议值。

1 工程概况

G1503高速公路跨吴淞江大桥采用大跨径闭口钢箱组合梁,跨径组合为(85+138+81)m,双幅布置,单幅标准桥宽16.25 m。主梁采用闭口钢箱组合梁,钢箱梁正交异性钢桥面板上设置150 mm普通混凝土板形成钢-混凝土组合桥面板。主梁支点梁高7.15 m,高跨比1/19.3;跨中梁高3.65 m,高跨比1/37.8。钢箱梁为单箱单室,挑臂宽度为4.375 m,箱室宽度为7.5 m。吴淞江大桥主梁总图及断面图如图1、图2所示。

2 分析方法

建立不同桥梁跨度、不同箱室宽度的大跨度连续

收稿日期:2023-01-12

作者简介:陈科旭(1994—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。



图1 吴淞江大桥主梁总图

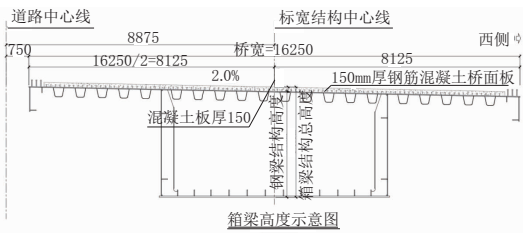


图2 吴淞江大桥主梁断面

组合箱梁有限元模型研究钢桥面板与混凝土桥面板的有效宽度系数变化规律。由于荷载形式和荷载大小不影响混凝土板和钢板有效宽度系数,故对模型仅添加线荷载。研究的组合钢箱梁跨径参数取值和箱宽跨度比见表1。

表1 跨径与箱宽跨度比对应

中跨跨径 L/m	箱室宽度 B/m	箱宽跨度比 B/L
160	7.5	0.047
140	7.5	0.054
120	7.5	0.063
100	7.5	0.075
80	7.5	0.094

2.1 有限元模型

为减小边界条件的影响,跨中节段和支点节段建立局部精细模型,其余部分建立梁单元简化模型,采用刚性连接将各部分组合为整体模型。在精细模型中,混凝土桥面板采用六面体实体单元模拟,钢箱梁采用四节点壳单元模拟。全桥共划分15 996个六面体实体单元、49 227个四边形壳单元、44个梁单元。钢桥面板与混凝土桥面板间不考虑滑移效应,采用共节点的方式连接。组合钢箱梁有限元模型如图3所示。

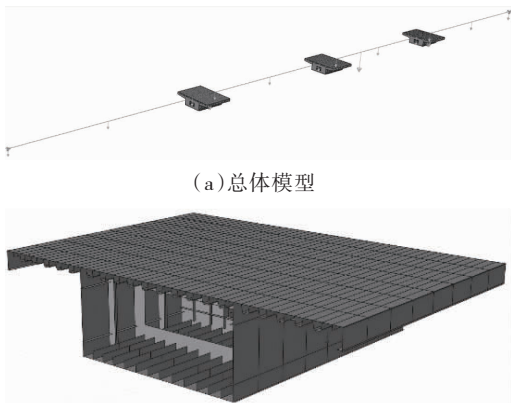


图3 有效宽度节段模型

2.2 有效宽度系数分析方法

2.2.1 有限元模型建立及网格划分

有效宽度计算可以按照轴力等效方法进行,主要思路是根据翼缘板实际正应力变化规律,在箱梁或T梁的翼缘板的实际几何宽度上选取其中一部分作为有效工作截面参与截面几何特征(惯性矩)的计算,然后按初等梁理论计算翼缘板的弯曲应力。

图4为T梁或箱梁翼缘板的实际应力 σ_x 分布,最大应力为 σ_{max} 。假定 σ_x 沿翼缘板板厚方向没有变化,则翼缘板上正应力合力为 $t \int \sigma_x dy$ 。有效宽度 B 区域内应力按简单梁理论分布,其值为 σ_{max} ,所产生的合力为 $\sigma_{max} \cdot B \cdot t$ 。

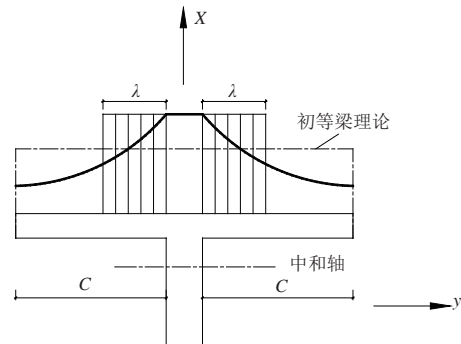


图4 T梁或箱梁翼缘板有效分布宽度

翼缘按初等梁理论计算所得截面轴力与实际截面轴力相等:

$$\sigma_{max} \cdot B \cdot t = t \int \sigma_x dy \tag{1}$$

有效宽度^[12]为:

$$B = \frac{t \int \sigma_x dy}{\sigma_{max} t} \tag{2}$$

有效宽度系数即为按式(2)计算所得的有效宽度与箱梁翼缘实际宽度的比值。

3 有效宽度系数影响因素分析

3.1 桥梁跨度(箱宽跨度比)

分别选取80 m、100 m、120 m、140 m、160 m五种桥梁跨度对比钢桥面板和混凝土桥面板有效宽度系数的大小。不同箱宽跨度比下的桥面板中支点截面和中跨跨中截面各位置的名义应力如图5所示。

由图5可知,混凝土桥面板箱室中部区域应力始终小于腹板位置,表明中部区域组合桥面板界面剪力较小,混凝土桥面板应力传递有滞后现象。中支点区域断面应力分布规律与箱宽跨度比无关,均为腹板处应力最大,并向两侧迅速减小。在跨中区域,随着桥梁箱宽跨度比减小,截面腹板间的混凝土板应力逐渐增大,而腹板附近翼板应力相应略有变小,

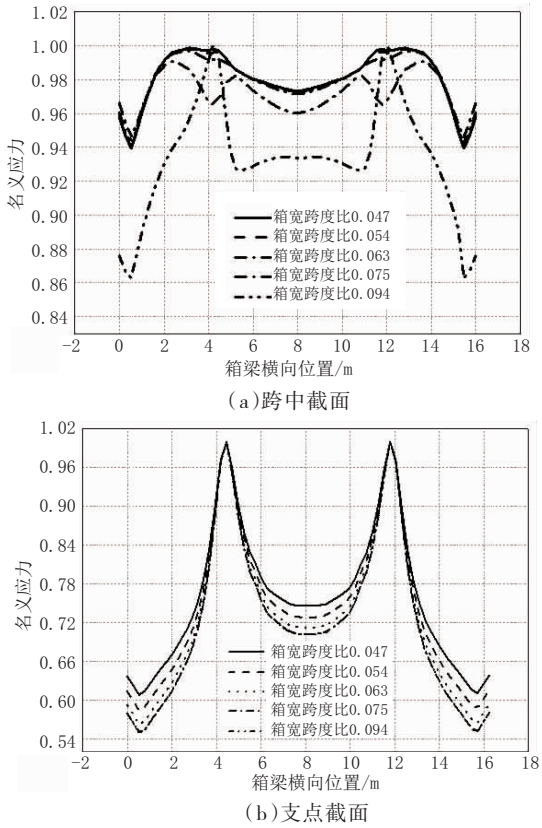


图5 混凝土桥面板名义应力曲线

表明全断面参与受力的程度越来越高。根据名义应力曲线计算各箱宽跨度比情况下的混凝土板跨中位置和支点位置有效宽度系数如图6所示。

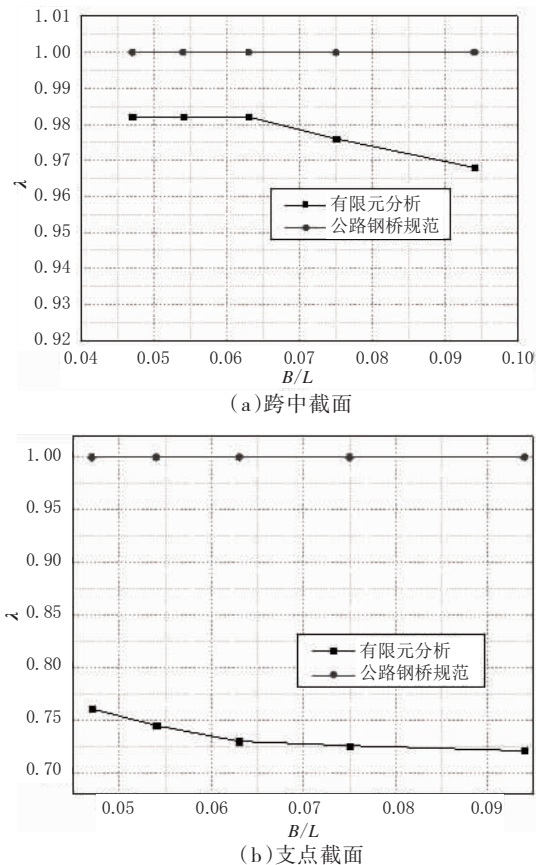


图6 混凝土桥面板有效宽度系数

由有限元分析结果可知,跨中和中支点断面的有效宽度系数变化规律为曲线。随着桥梁箱宽跨度比从0.047增加至0.094(桥梁跨径由160 m减小至80 m),跨中断面钢桥面板的有效宽度系数从0.982减小至0.968,减小约1.32%;中支点断面钢桥面板的有效宽度系数从0.761减小至0.721,减小约5.5%。可见,箱宽跨度比变化对支点断面影响较大。同时,无论跨中还是支点,实际有效宽度系数比规范小,跨中断面最大相差约3.25%,中支点断面最大相差达27.9%。可见,闭口组合钢箱梁混凝土桥面板有效宽度不可按槽型组合箱梁的混凝土桥面板计算。

图7为箱梁支点和跨中区域钢桥面板名义应力曲线图。由图7可知,支点区域钢桥面板与混凝土桥面板名义应力曲线分布规律相似,跨中区域钢桥面板与混凝土桥面板名义应力曲线分布规律相反。中支点区域断面应力分布规律与箱宽跨度比无关,均为腹板处应力最大,并由腹板向两侧迅速减小。跨中区域截面随着桥梁箱宽跨度比减小,箱梁腹板间的钢桥面板应力增大,并开始高于腹板处应力,这是由截面参与受力面积的增加造成的。由图7计算各箱宽跨度比下的钢板有效宽度系数如图8所示。

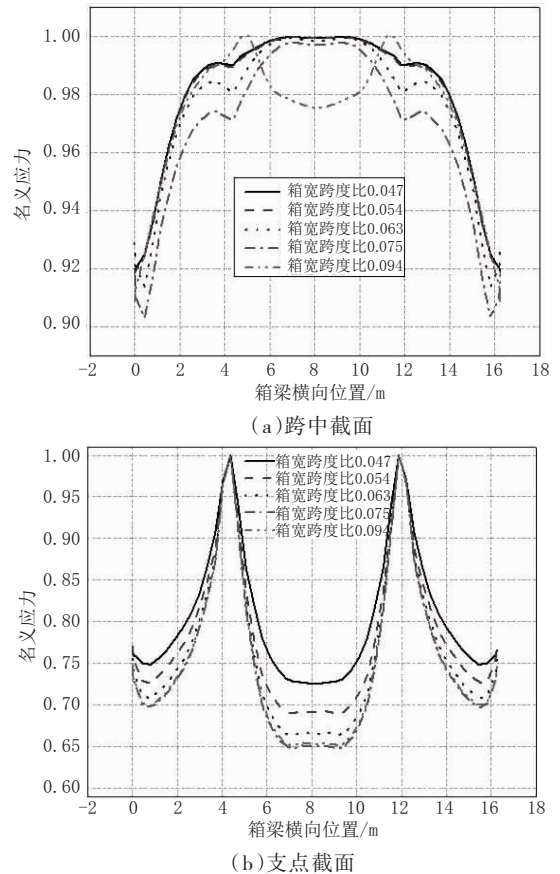
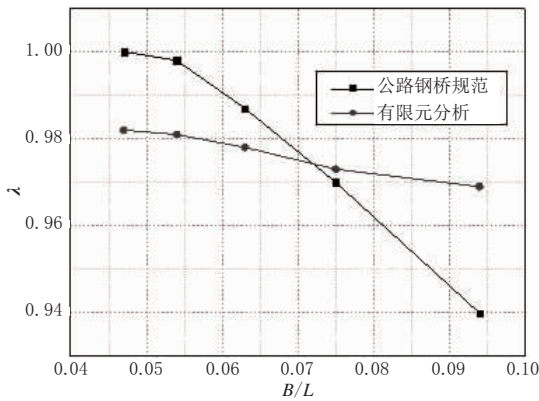
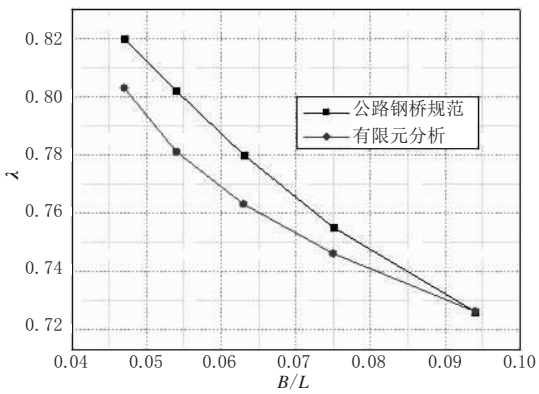


图7 钢桥面板名义应力曲线



(a)跨中截面



(b)支点截面

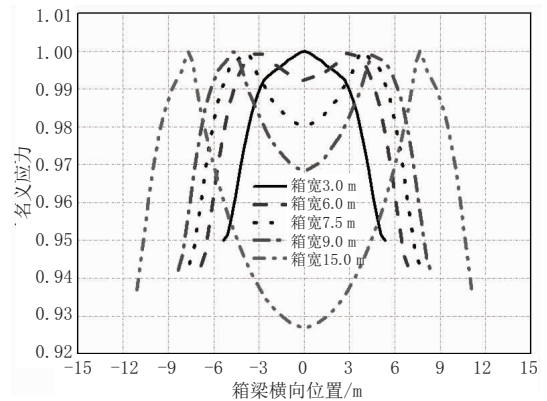
图8 钢桥面板有效宽度系数

由图8可知,随着桥梁箱宽跨度比从0.047增加至0.094(桥梁跨径由160 m减小至80 m),跨中断面钢桥面板的有效宽度系数从0.982减小至0.969,减小约1.32%;中支点断面钢桥面板的有效宽度系数从0.806减小至0.726,减小约9.93%。可见,箱宽跨度比变化对支点断面影响较大。跨中和中支点断面的有效宽度系数下降曲线接近线性,可以利用线性差值计算断面有效宽度系数。

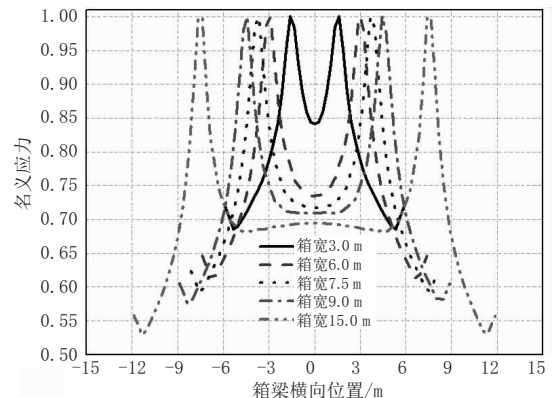
断面实际有效宽度系数值比规范值略小,跨中断面最大相差约3.10%,中支点断面最大相差约4.13%。可见,设计可按规范计算断面有效宽度。此时截面作用效应偏小,偏不安全,应留有富余量予以弥补,建议至少富余10%以上。按规范计算断面有效宽度时,当箱宽跨度比大于或小于规定值时,有效宽度不再变化,有限元分析表明仍有变化,且是两者误差相对较大区域,设计中应予以重视。

3.2 箱室宽度

分别选取箱室宽度3 m、6 m、7.5 m、9 m、15 m五种桥宽研究钢桥面板和混凝土桥面板有效宽度系数分布规律。箱室宽度变化时,翼缘宽度保持不变。不同箱宽跨度比下的混凝土桥面板中支点截面和跨中截面各位置的名义应力如图9所示。



(a)跨中截面



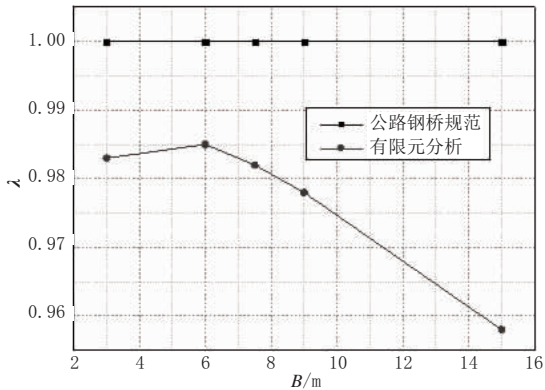
(b)支点截面

图9 混凝土桥面板名义应力曲线

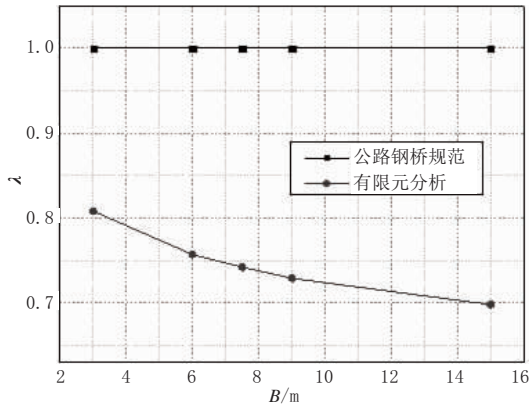
由图9可以看出,跨中断面箱室宽度增加时,箱室中部翼板应力快速减小,且减小幅度逐渐增大。中支点区域的箱室宽度小于挑臂宽度时,箱室中部翼板应力快速减小;箱室宽度大于挑臂宽度时,随着箱室宽度的增大,箱室中部翼板应力减小幅度较小。同时可以发现,在跨中区域,截面箱室中部应力为腹板处的92%,中支点区域的应力比仅为70%。

图10为不同箱室宽度下的混凝土桥面板有效宽度系数。由图10可见,箱室宽度由3 m增加至15 m,中跨跨中截面混凝土桥面板有效宽度系数从0.983减小至0.958,相差约2.54%;中支点截面混凝土桥面板有效宽度系数从0.808减小至0.698,相差约13.6%。表明箱室宽度增加,箱宽跨度比增加,截面有效宽度减小,中支点最为显著,与钢桥面板规律一致。通过有限元分析结果与公路钢桥规范计算结果对比可见,按槽型组合箱梁计算混凝土板有效宽度,与有限元分析结果相差较大,中支点处相差最大约30.2%,表明组合桥面板不可按槽型箱梁模型考虑混凝土桥面板有效宽度。

由图11可知,跨中断面随着箱室宽度增大,钢桥面板在箱室之间应力比曲线逐渐由凸曲线变为凹曲线,表明箱室宽度增加时,翼板剪力滞后效应越来



(a)跨中截面



(b)支点截面

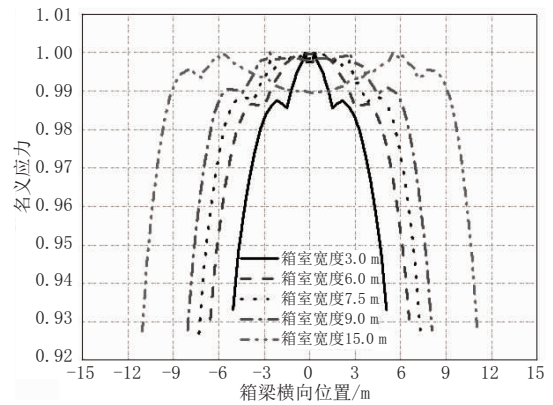
图 10 混凝土桥面板有效宽度

越明显,材料利用率越来越低。跨径较大时,箱宽跨度比较小,剪力滞后效应量值上较小;中支点断面随着箱室宽度增大,钢桥面板在箱室之间应力比曲线变化规律相同,但箱室增大时,应力比曲线在箱室之间的下凹平台曲线越来越长,表明箱室越宽,支点断面处翼板材料利用率越低,故大跨径宽箱室箱梁在中支点区域适宜增设腹板,以提高材料利用率。挑臂板的应力比曲线为下降趋势陡峭,表明挑臂板剪力滞后效应显著,有效宽度较小,故挑臂范围内主要考虑横向受力,纵向按三边简支、一边自由考虑。

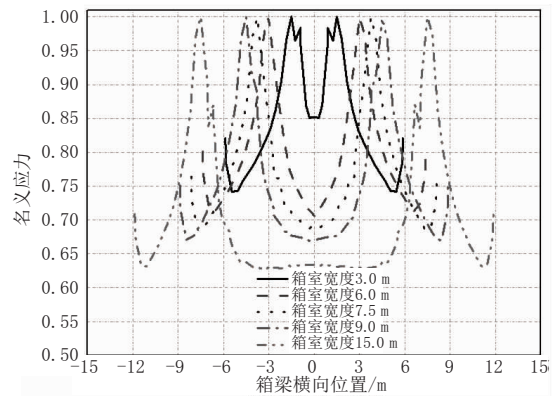
由图 12 可知,随着箱室宽度由 3 m 增加至 15 m,跨中断面翼板有效宽度系数由 0.973 增加为 0.985,变化差值约 1.23%,影响程度较小;中支点截面翼板有效宽度系数由 0.846 减小至 0.698,变化差值约 17.5%,影响程度显著。同时可以发现,有限元分析结果基本小于规范值,故设计时按规范取值时宜折减。此外,跨中断面有效宽度系数变化曲线与规范值相反,是由挑臂长度不变,随箱室宽度增加,其占比越来越低,故全宽有效宽度略有增加造成的。

3.3 钢板/混凝土板有效宽度系数对比分析

组合桥面板的钢桥面板应力分布规律与混凝土桥面板相似,表明组合桥面板在剪力连接件作用下

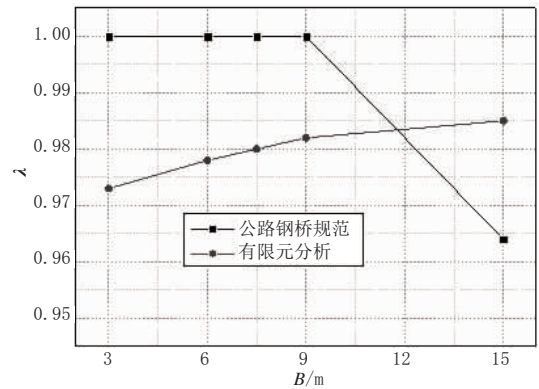


(a)跨中截面

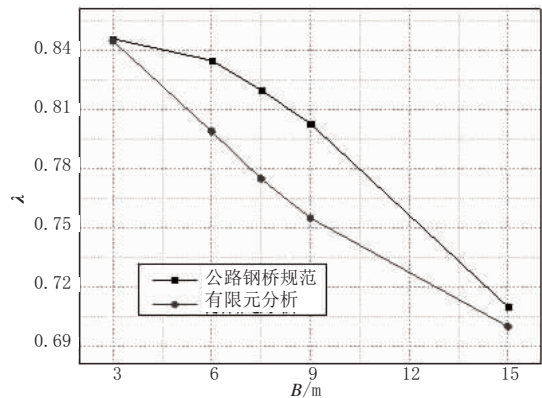


(b)支点截面

图 11 钢桥面板名义应力曲线



(a)跨中截面



(b)支点截面

图 12 钢桥面板有效宽度

共同承担外部作用。规范中仅给出按槽型组合梁计算的桥面板有效宽度系数,本文对比闭口钢箱组合

梁不同跨径、不同箱室宽度下钢桥面板和混凝土桥面板有效宽度系数分别如图 13、图 14 所示。

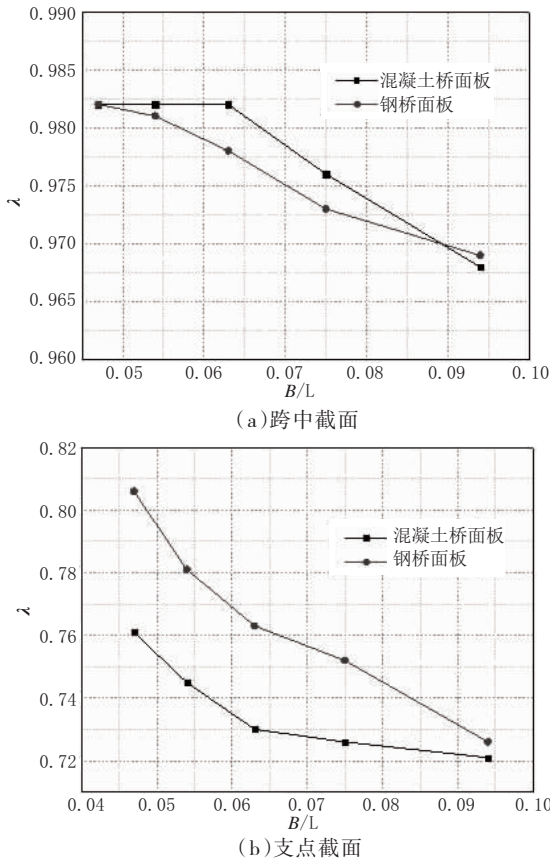


图 13 钢桥面板和混凝土桥面板有效宽度对比

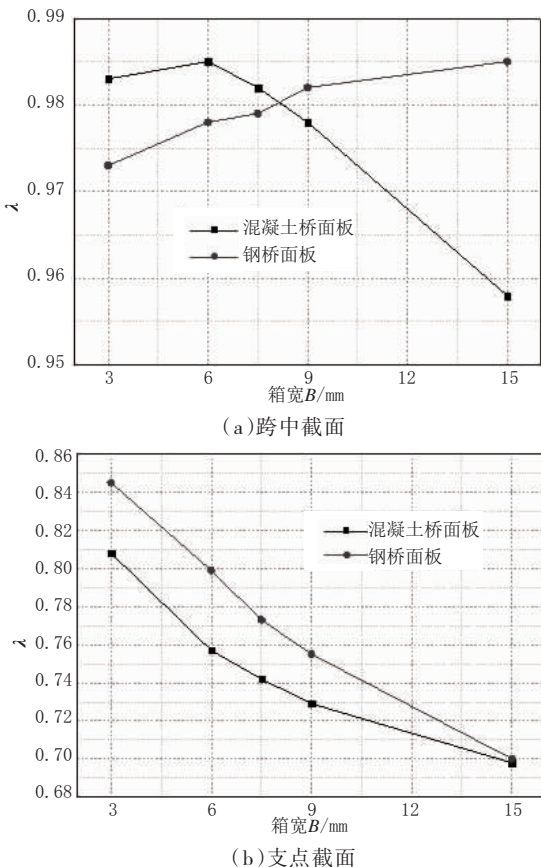


图 14 钢桥面板和混凝土桥面板有效宽度对比

由图 13 可知,钢桥面板和混凝土桥面板有效宽度系数随箱宽跨度比(跨径)变化规律一致。跨中断面的钢桥面板有效宽度系数略小于混凝土桥面板,最大相差约 0.51%。中支点断面的钢桥面板有效宽度系数大于混凝土桥面板,两者数值最大相差约 5.9%。同时可见,两者差值随箱宽跨度比增加(跨径减小)而减小。

箱室宽度变化时,跨中断面的钢桥面板与混凝土桥面板的有效宽度变化趋势不同,但数值上相差很小,最大仅相差 2.6%。支点断面的钢桥面板与混凝土桥面板的有效宽度变化趋势相同,且混凝土桥面板有效宽度小于钢桥面板,箱宽越小相差越大,最大相差 3.7%。由以上分析可得,混凝土桥面板有效宽度可采用钢桥面板数值,但应折减 0.9 倍更符合实际情况。

4 结论

本文依托 G1503 高速公路桥主跨 138 m 闭口钢箱组合梁桥,通过建立精细化的空间有限元模型研究了不同桥梁跨度、不同箱室宽度下组合桥面板的混凝土板和钢板的有效宽度系数,并进行对比。

(1)组合桥面板中,钢桥面板和混凝土桥面板横断面应力分布规律相似。

(2)钢桥面板的有效宽度与规范规定基本相等,跨中断面小约 0.41%,支点断面小约 4.13%。混凝土桥面板的有效宽度与规范差异较大,跨中断面小约 3.25%,支点断面小约 27.9%。

(3)组合桥面板中,钢桥面板有效宽度比混凝土桥面板有效宽度大,跨中断面相差 0.51%,支点断面相差 5.9%,混凝土桥面板有效宽度系数可参考钢桥面板有效宽度系数折减 0.9 倍取值。

参考文献:

[1] 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.

[2] 赵虎,勾红叶,尼颖升.波形钢与混凝土混合多箱室斜拉桥的剪力滞效应[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(7):93-103.

[3] 程坤.大跨度变截面波形钢腹板组合连续箱梁有效分布宽度研究[D].南昌:华东交通大学,2020.

[4] 谢上飞.钢-超高性能混凝土组合梁剪力滞分析的有限梁段法[J].铁道科学与工程学报,2021,18(2):440-449.

[5] 徐腾飞.钢-混凝土组合箱梁剪力滞效应数值研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.

[6] 冯秋然,管乐,金建平,等.双工字钢-混凝土组合梁桥剪力滞效应分析[J].水利规划与设计,2021(3):124-129.

(下转第 229 页)

表3 腹板集中力分配表 单位:kN

腹板号	腹板集中力均分	腹板集中力按剪应力分配
腹板 1	3 929	1 861
腹板 2	3 929	6 203
腹板 3	3 929	3 102
腹板 4	3 929	3 102
腹板 5	3 929	3 102
腹板 6	3 929	6 203

2.2 结果对比

按板壳有限元模型计算得到的横向正应力、按板壳有限元模型和梁单元模型计算得到的中横梁顶板横向正应力见图5、图6。

从计算结果可看出,在横梁跨中(即 x=20 m 位置处),板壳有限元模型计算结果(19.5 MPa)与梁单元模型计算结果(分别为 20.2 MPa 和 22.1 MPa)非常接近,且按照 25.2°的有效分布宽度扩散角的梁单元模型计算结果基本能够包络板壳有限元模型的计算结果,是偏于安全的。另外,腹板集中力按剪应力分配的计算结果(20.2 MPa)相比腹板集中力均分的计算结果(22.1 MPa)更接近于板壳有限元模型的计算结果,但若采用腹板集中力均分的方式也可满足工程精度的要求。在板壳有限元模型中,支点位置(尤其是左侧支点位置)的横梁顶板应力计算值与梁单元模型相差较大,这是板壳有限元模型支点处的局部应力集中所致。

3 结语

(1)以无限长板带对位荷载下的应力简化计算公式为基础,导出的不同桥宽和不同外伸横梁宽度对应的有效分布宽度扩散角,对超宽桥梁的横梁横向

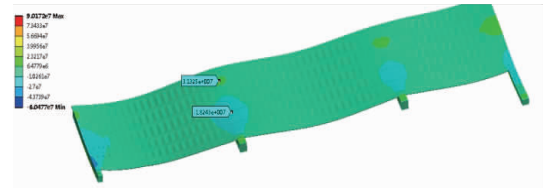


图5 按板壳有限元模型计算得到的横向正应力(单位:Pa)

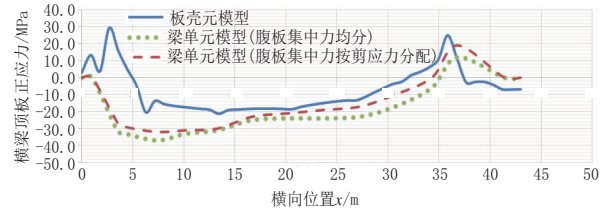


图6 按板壳有限元模型和梁单元模型计算得到的中横梁顶板横向正应力对比

应力计算有一定的参考价值。

(2)用板壳有限元模型和梁单元模型对实际工程中的超宽外伸中横梁顶板横向正应力进行对比分析时,采用导出的有效分布宽度扩散角的梁单元模型计算结果与板壳有限元模型计算结果是非常接近的,且能够包络板壳有限元模型的计算结果,是偏于安全的。在实际工程中也可进一步考虑一定的安全富余度。

(3)文中对于超宽外伸横梁受力的计算方法有待进一步验证,但可为同类型桥梁的横向受力计算提供借鉴和参考。

参考文献:

[1] 韦春陆.超宽箱梁多种支承条件下横梁结构受力研究[D].南京:东南大学,2015.

[2] 卫军,黄敦文,张仕卓,等.交叉梁体系桥面板荷载有效分布宽度试验研究[J].土木工程学报,2019,52(6):92-109.

[3] 吴冲.钢桥[M].北京:人民交通出版社,2008.

[4] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].

[5] 施江涛.无限长板带对位荷载下的有效分布宽度计算和应力分析方法[J].城市道桥与防洪,2021(12):150-152.

(上接第 219 页)

[7] 邵真宝,王佐才.双主梁钢板组合梁截面剪力滞效应研究[J].安徽建筑,2021(5):126-129.

[8] 陈雨阳,王佐才,王书航.铁路波形钢腹板PC组合梁桥剪力滞效应分析[J].工程与建设,2020,34(3):377-381.

[9] 赵竑宇.双箱单室曲线波形腹板钢箱-混凝土顶板组合箱梁剪力

滞效应分析[D].兰州:兰州交通大学,2020.

[10] 杜铁刚.-UHPC组合梁剪力滞效应研究[D].长沙:湖南大学,2019.

[11] 齐飞翔.连续曲线钢-混凝土组合箱梁剪力滞效应研究[D].石家庄:石家庄铁道大学,2020.

[12] 项海帆,等.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2001.