

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.07.024

宽幅钢箱梁若干设计要点研究

李泽霖

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘要: 随着经济建设的发展,桥梁宽度日益增加,宽幅钢箱梁被广泛的应用于各类工程实践,为探究此类结构的受力模式,以 2×40 m跨径的宽幅钢箱梁为研究对象,建立三维数值分析模型。以典型工况为荷载条件,验证单梁法、梁格法及板壳单元法的设计精度,在此基础上,分析、归纳及总结了宽幅钢箱梁的受力特性,结合有限元分析成果及中外规范着重论述了宽幅钢箱梁横梁的受力模式及简化计算方法,提出了宽幅钢箱梁的设计建议,以期为类似结构的设计提供参考。

关键词: 宽幅钢箱梁;梁格法;板壳单元法;剪力分布;横梁;剪力滞;局部稳定

中图分类号: U448.21+3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)07-0104-06

0 引言

目前我国的交通建设为适应经济需求而迅猛发展,高速、大流量成为现代城市交通发展的主要特征,城市高架系统的桥梁宽度日益增加。近年来,具有现代气息的少支座大悬臂钢箱梁因对宽幅桥面适应程度高、对桥下路网空间友好、相比同等跨度混凝土箱梁,抗弯、抗扭及抗剪性能优越,其结构轻快,纵横向跨越能力大,工厂加工、现场分段吊装的施工模式,大幅度缩短了现场工期而被各地区高架系统所优选。

但相较于传统的横向多支点预制结构或窄幅钢结构,宽幅钢箱梁因其不仅在纵向发生挠曲变形,同时横向相应的产生较大挠曲变形,结构受力形式复杂,常规的单梁计算方法已难以体现宽幅钢箱梁的受力特点,故本文通过对比单梁法、剪力柔性梁格法及板壳单元法等不同模型,总结归纳一些此类结构受力特性及设计方法,为类似结构提供一些理论参考。

1 工程概况

本文以跨径 2×40 m,桥宽18 m的常规高架桥为研究对象。为便于结构整体的受力性能研究,简化板件厚度配置及忽略钢结构加劲影响,研究对象为单箱五室钢箱梁,顶、底板厚度采用16 mm,腹板厚度12 mm,隔板厚度10 mm。梁高2 000 mm,箱

式宽度3 000 mm,悬挑宽1 500 mm,标准隔板间距3 000 mm,结构总体布置见图1。

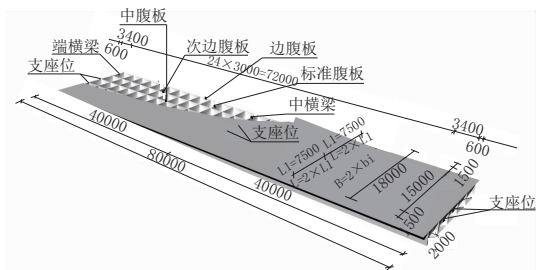


图1 钢箱梁总体布置(单位:mm)

2 数值模型

以Midas Civil及ANSYS为平台,将研究对象抽象为单梁、梁格及板壳分析模型进行研究。

单梁法是桥梁结构传统的设计分析方法,因其建模简单,荷载传递路径明确易于校核,可直接获得结构内力及变形,进而根据截面特性计算出控制点应力,但无法获得结构的空问效应。剪力柔性梁格法是一种将分散于梁板部分区域内的结构等效为纵、横交叉梁的空问近似方法,其相较于单梁模型可以反应出结构的空问效应,但由于其将结构进行切分、组装,会影响结构计算精度。根据板的弯曲理论,由于材料泊松比的影响,结构的纵横向受力会相互影响^[1],对于泊松比较小的混凝土梁,通常可忽略此影响,但钢结构材料的泊松比几乎为混凝土材料的两倍,因此对钢箱梁采用剪力柔性梁格法仍需对比研究。板壳单元法是通过将复杂的空问结构以板壳单元进行离散,对于钢箱梁此类薄壁结构,细密划分的板壳单元可以满足结构各种受力行为的分析^[2],但由于在工程设计中,其几何前处理,边界施加,荷载等效及繁杂的后处理

收稿日期: 2023-02-04

作者简介: 李泽霖(1989—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计与研究工作。

等工作导致效率有限。各数值分析模型见图 2。材料力学性能见表 1。

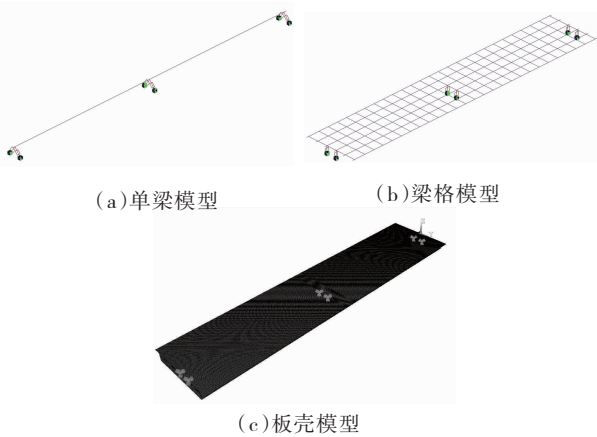


图 2 数值分析模型

表 1 材料力学性能表

材料	容重 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 / MPa	泊松比 ν	热膨胀系数 / ($1/\text{C}^\circ$)
钢材 Q345	7 850	2.06×10^5	0.31	1.2×10^{-5}

分别采用三种典型荷载对比分析不同模型的受力模式,各类荷载按线荷载施加于腹板与顶板交线,从而减少第二、三体系的影响。

工况一:桥面均布荷载,因各箱式上翼缘从属宽度相同,故简化为于每道腹板处施加 10 N/mm 的均布荷载,此类荷载可以反应结构在自重、桥面铺装等工况的受力模式;

工况二:横向对称荷载,于结构两侧外腹板处各施加 10 N/mm 的均布荷载。

工况三:横向反对称荷载,于结构两侧外腹板处分别施加 10 N/mm、-10 N/mm 的均布荷载。

根据工况二与工况三的组合可以获得结构在横向偏心荷载作用下的结构受力状态。

其中梁格模型中构件的截面特性参照《Bridge Deck Behaviour》^[3]所提供的方法取用,见表 2。

表 2 梁格构件截面特性

子项	弯曲刚度	扭转刚度(单位宽度)	剪切刚度
纵梁	$E \cdot I_y$	$G \cdot J_x = 2G(h'^2 d' + h''^2 d'')$	$G \cdot A_s$
横梁	$E \cdot I_x$	$G \cdot J_y = 2G(h'^2 d' + h''^2 d'')$	$G \cdot A_s$

注: E 为材料弹性模量, I_y 、 I_x 纵、横梁相对箱梁整体截面中性轴的惯性矩, G 为材料剪切模量, d' 顶板厚度, d'' 底板厚度, h' 顶板至中性轴距离, h'' 底板至中性轴距离, A_s 等效剪切面积。

3 受力特点分析

为验证各类模型的精度及对比不同模型所反应出的结构特性,选取了三种工况下具有代表性的结

构支反力、形心竖向位移、纵向正应力及腹板剪力进行对比,见表 3。

表 3 支反力对比表

单位: 10^5 N

工况	位置	单梁		梁格		板壳	
		左支座	右支座	左支座	右支座	左支座	右支座
一	边支点	4.65	4.65	4.66	4.66	4.68	4.68
	中支点	14.7	14.7	14.7	14.7	14.6	14.6
二	边支点	1.55	1.55	1.55	1.55	1.56	1.56
	中支点	4.90	4.90	4.89	4.89	4.88	4.88
三	边支点	10.2	-10.2	9.75	-9.75	11.4	-11.4
	中支点	19.7	-19.7	20.5	-20.5	17.6	-17.6

由表 3 可知在三种典型工况下,三种模型所得的分布规律基本相同,数值大小略有区别,但相差不大,可以满足工程设计精度。

由图 3~图 5 可知,对于均布荷载及横向对称荷载三种模型所得的形心竖向位移分布规律基本相同,对于跨中区域单梁模型小于梁格模型及板壳模型,对于支点区域,由于空间效应,边腹板及次边腹板均产生了竖向变形,且梁格竖向位移略大于板壳模型,反应梁格模型的刚度要低于板壳模型。纵向正应力分布规律基本相同,对于跨中区域,均可以达到较好的工程精度,对于支点区域,板壳模型明显的出现了剪力滞效应,相对来说由于梁格纵梁离散个数的原因体现出了剪力滞效应,但精度不足。各梁位处的竖向剪力,分布情况有所区别,单梁模型腹板剪力只可以体现出总体剪力,但对于每道梁位无法准确反应剪力的分配,对于梁格模型及板壳模型,可以明显的看出支点区域靠近支座的中腹板剪力远大于次边腹板及边腹板,并随向跨中的延伸各腹板剪力趋于平均。

对于横向反对称荷载的三种模型,单梁模型已失真。梁格模型与板壳模型趋势相同,其中梁格竖向位移略大于板壳模型,对于跨中区域,梁格纵向正应力略大于板壳模型;对于支点区域,由于剪力滞效应,此精度下的梁格纵向正应力略小于板壳模型,梁格模型与板壳模型靠近支座的中腹板剪力均在支点附近突变。

由图 6 典型断面处的纵桥向正应力可以看出,在横向对称荷载工况下,除中支点断面下缘支座约束范围内板壳模型腹板处正应力绝对值均略低于梁格模型,梁格模型的结果均更接近于不计泊松效应的板壳模型。

由前文分析,宽幅钢箱梁于支点范围内的腹板剪

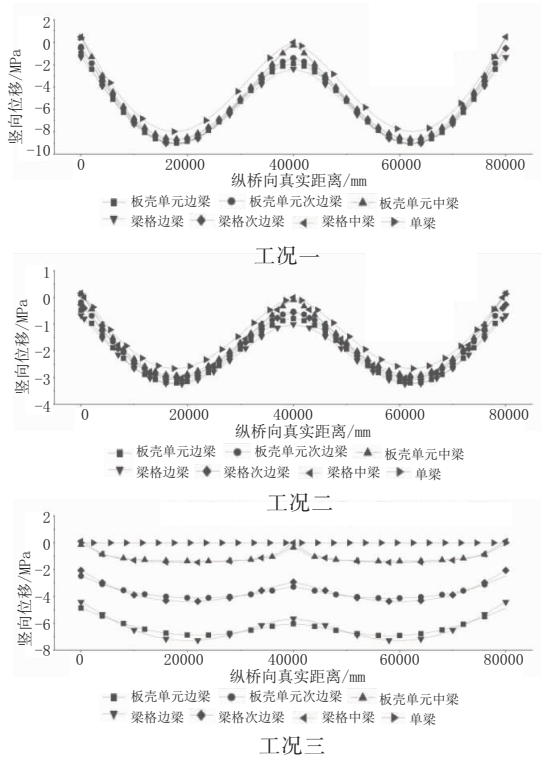


图3 形心竖向位移(单位:mm)

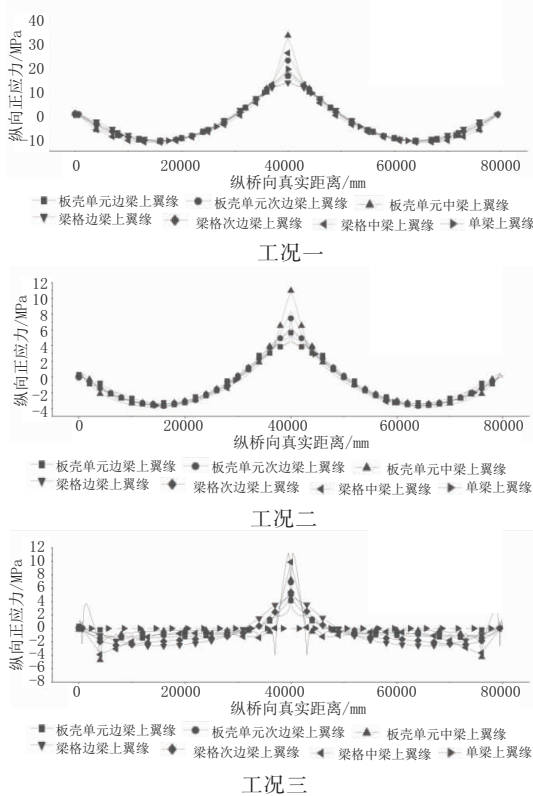


图4 纵向正应力(单位:MPa)

力分配并不均匀,为研究腹板不均匀剪力的分配规律,本文分别对横梁顶(底)板厚度、腹板厚度、结构跨径及箱式宽度等因素进行对比分析。由图7可知,当结构箱式个数、梁高及支座位置确定后,每道腹板分配的剪力比例浮动有所变化,但仍处于一定范围内,其中对横梁顶(底)板厚度、腹板厚度敏感度低,

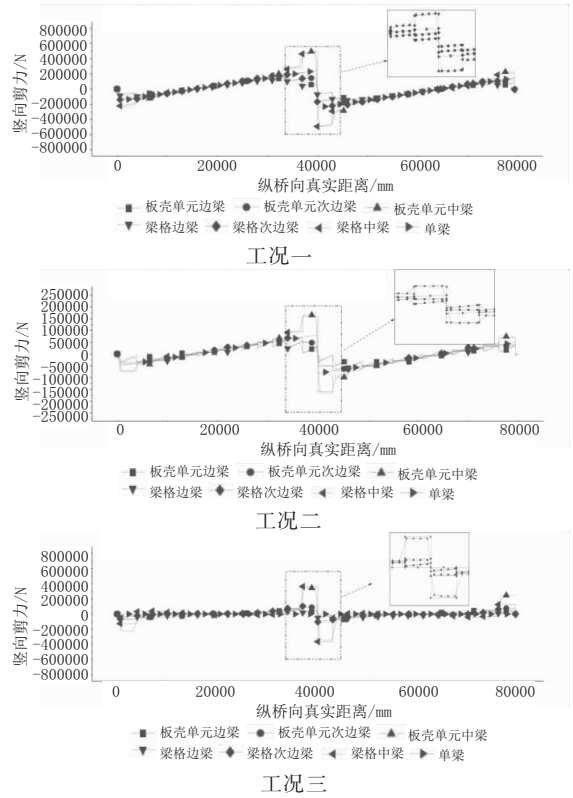


图5 竖向剪力(单位:N)

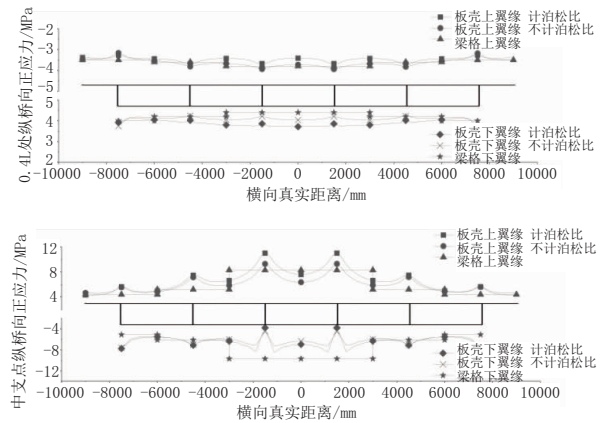


图6 典型断面处纵桥向正应力(单位:MPa)

对跨径及箱式宽度等影响结构纵横向抗弯刚度的因素则有明显影响,靠近支座的腹板剪力分配系数与跨径成反比,与箱式宽度成正比。同时,为探究横梁刚度对腹板剪力分配的影响,分别考虑不同支座隔板厚度及横梁形式,由图8可知,采用箱形横梁或加厚隔板厚度可以降低腹板剪力的不均匀分配,但不同梁位处的腹板仍存在较大的剪力差值。

由图9可知,支座隔板集中了全桥横向大部分剪力,跨中隔板主要承担所属范围内局部的横向剪力,但靠近支座隔板的隔板同样承担了部分整体横向剪力,这种现象也同纵向腹板于支座附近剪力分布不均相协调。为研究支座附近隔板需加强范围,分别建立 $2 \times 20 \text{ m} \sim 2 \times 50 \text{ m}$ 跨径的模型,同时将隔板

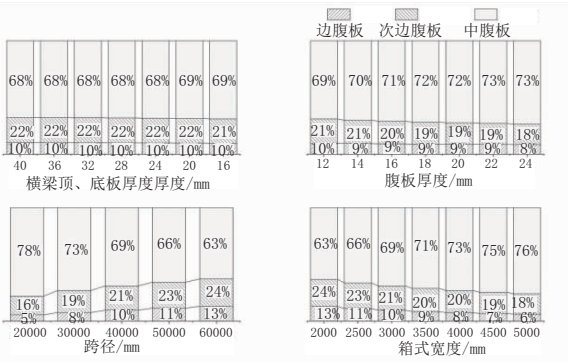


图7 腹板剪力分配

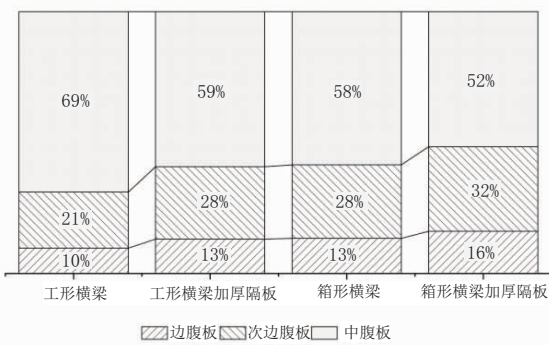


图8 横梁形式及隔板厚度对腹板剪力分配的影响

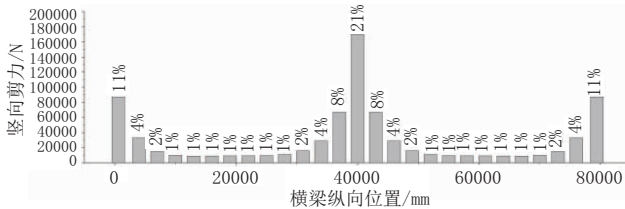


图9 横隔板剪力分布

间距加密至 1 m,以细化影响范围,由图 10 可知,支座附近隔板单侧需加强范围约 5 m 左右,并且加强范围对跨径的敏感度较低。

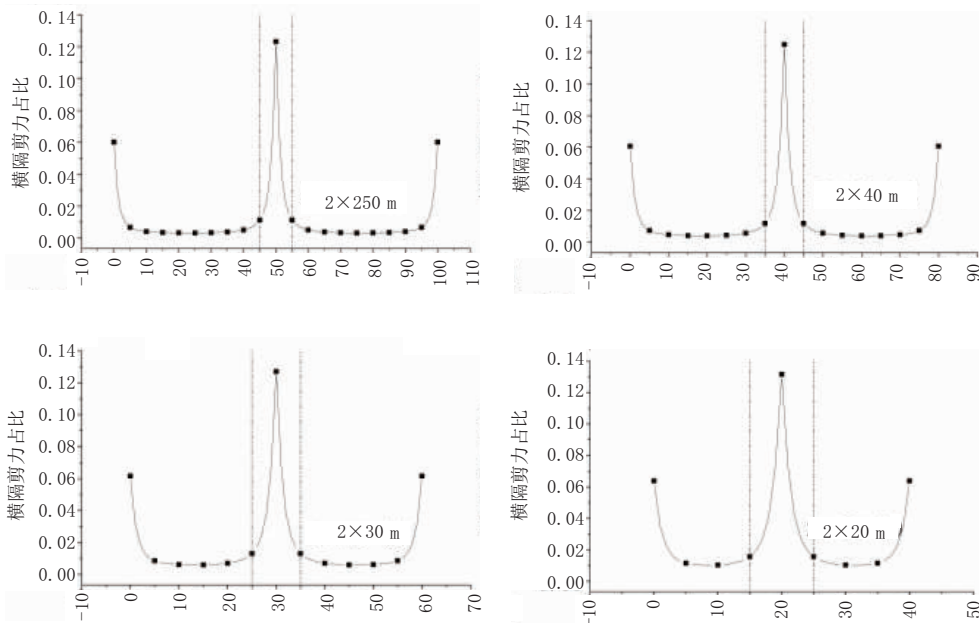


图10 不同跨径横隔板剪力占比

4 横梁分析

对横梁的简化受力分析,主要需考虑荷载的加载形式及验算截面尺寸,以上文的横向对称荷载工况为例,对近中横梁截面进行应力积分如下表 4,由于结构及荷载均对称布置,表中仅取 1/2 桥宽范围内数据,由表 4 可知桥梁纵向传至横梁的剪力几乎均由腹板进行传递。

表4 近中横梁竖向剪力分配情况 单位:N

位置	挑臂	边腹板	边箱	次边腹板	次边箱	中腹板	1/2 中箱
剪力	66	2.86 × 10 ⁴	334	4.87 × 10 ⁴	9 187	1.47 × 10 ⁵	8 991
%	0.03	11.8	0.14	20.1	3.8	60.5	3.7

大部分城市高架的宽幅钢箱梁为提高地面道路使用空间,因此横向支座间距较小,宽幅钢箱梁的横梁呈现为悬臂连续梁受力体系,综上宽幅钢箱梁的横梁可简化为受集中荷载的悬臂连续梁结构。

对于横梁的验算截面尺寸,采用钢桥面板的钢箱梁其桥面板兼作纵、横梁的上翼缘,此时纵、横梁具有很大宽度的翼缘。由于较宽的翼缘已不适合单纯的平截面假定理论,其翼缘正应力已分布不均匀,具有明显的剪力滞效应。对于受压翼缘需考虑剪力滞及局部稳定的共同影响,对于受拉翼缘需考虑剪力滞的影响。

为研究受集中荷载的悬臂梁结构受剪力滞影响而确定的截面有效宽度,本文采用 ANSYS 建立悬臂

结构见图 11,材料特性同前文。

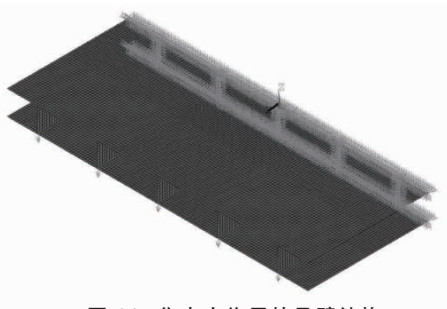


图 11 集中力作用的悬臂结构

为减少边界条件的影 响,共设置五道腹板同时施加集中荷载,对腹板间距进行单变量分析,并与中、日、美三国规范进行对比,整理有效宽度与腹板间距 l 等效跨径之间的相对关系如图 12。中国规范《公路钢结构桥梁设计规范》^[4]及日本规范《道路橋示方書·同解説》^[5]中对于翼缘有效宽度均采用根据不同结构形式分别取用式(1)及式(2)的形式,式(1)与式(2)的不同形式主要是根据结构受荷载弯矩图呈现的区别所致^[6],对于弯矩图呈抛物线分布时采用式(1),弯矩图呈三角形分布时采用式(2)。对于悬臂结构中国规范采取了式(1),日本规范采取了式(2)的形式,这是两国规范的主要区别。对于美国规范《AASHTO LRFD Bridge Design Specifications》^[7]采用式(3)的形式。为统一表述形式,图 12 中的 B/L 为腹板间距 l 等效跨径, $\lambda = b_{od} / B$ 。

$$b_{e,i}^s \begin{cases} b_i, & \frac{b_i}{l} \leq 0.05 \\ (1.1 - 2\frac{b_i}{l})b_i, & 0.05 < \frac{b_i}{l} < 0.3 \\ 0.15l, & \frac{b_i}{l} \leq 0.3 \end{cases} \quad (1)$$

$$b_{e,i}^s \begin{cases} b_i, & \frac{b_i}{l} \leq 0.02 \\ [1.06 - 3.2\frac{b_i}{l} + 4.5(\frac{b_i}{l})^2]b_i, & 0.02 < \frac{b_i}{l} < 0.3 \\ 0.15l, & \frac{b_i}{l} \leq 0.3 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $b_{e,i}^s$ 为翼缘有效宽度; b_i 为腹板间距的 1/2 或翼缘外伸肢为伸臂部分的宽度; l 为等效跨径。

$$b_{od} \begin{cases} B, & \frac{L}{B} \geq 5 \\ \frac{1}{5}L, & \frac{L}{B} < 5 \end{cases} \quad (3)$$

式中: b_{od} 为翼缘有效宽度与 $2b_{e,i}^s$ 等价; B 为腹板间距; L 为等效跨径。

对于受集中力的悬臂结构,其弯矩图呈现三角形,结合图 12 分析,故有效分布宽度在 $B/L < 0.3$ 的

区域内与式(2)拟合的较好。当 $B/L > 0.3$ 时,数值分析模型的有效宽度位于式(2)与式(3)之间,其中在 $B/L > 0.6$ 的范围式(2)与式(3)对应的有效宽度 b_{od} 均与等效跨径呈线性关系,其系数分别为 0.3 (2×0.15)及 0.2,对数值分析结果进行回归分析,其系数为 0.237,故简化系数按 0.24 取用。横梁计算翼缘有效宽度时的腹板间距采用纵桥向跨径,其等效跨径为 2 倍挑臂长度,对于常规宽幅钢箱梁其 B/L 一般大于 0.6,因此建议宽幅钢箱梁的横梁在进行简化分析时其翼缘总宽度取 0.24 倍的等效跨径。对于横梁支座间区域内横梁的有效宽度,中国规范《公路钢结构桥梁设计规范》按照式(1)采用等效简支梁的形式进行内插,然而规范所给定的公式前提是于弯矩零点切取等价简支梁^[8]。而对于宽幅钢箱梁的横梁,由于横桥向支座间距较小,较难在横向支座间距间形成等价简支梁。因而规范所给定的公式并不完全适用于横梁的简化计算,故对于未形成等价简支梁的横梁中跨其翼缘有效宽度仍建议按照对应悬臂部分所采用的有效宽度。

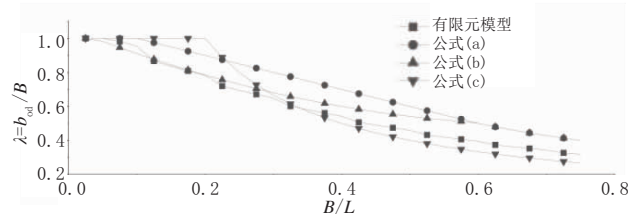


图 12 有效分布宽度

在前述工况二的作用下,按照所述的简化计算方法与梁格及板壳单元进行对比,横梁横向正应力见图 13,从对比分析可知:简化模型可以较准确的模拟结构受力特点及应力状态,对于梁格模型因纵梁的扭转在各梁位处形成应力突变,对此,可以通过加密横梁区域范围内的纵梁个数降低此影响。

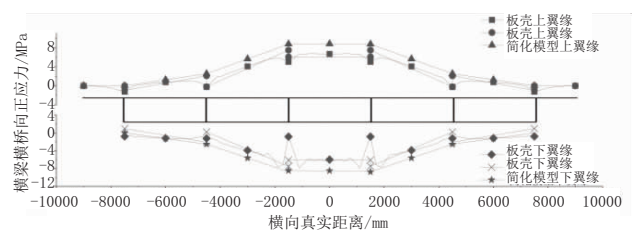


图 13 横梁横向正应力(单位:MPa)

横梁结构板件的局部稳定所引起的受压翼缘宽度折减是考虑了板件的初始几何缺陷、焊接残余应力等影响,《公路钢结构桥梁设计规范》中局部稳定采用 Perry 公式^[9],其中缺陷系数同 d 类屈曲曲线类型为 0.8,折减起始宽厚比 0.4,对不同位置处的横梁因其空间受力不同,其考虑的板元弹性屈曲系数的

方式也不尽相同。对于端横梁,几乎不存在纵桥向的正应力,因此可以按照简化为四边简支均匀受压板元的弹性屈曲考虑,弹性屈曲系数 $k \geq 4^{[10]}$;对于中横梁,由于纵横向正应力的叠加作用,应简化为四边简支双向均匀受压板元的弹性屈曲考虑,本例中纵、横向箱式近似正方形,板件长宽比 $\alpha=1$,一般工程设计中出于经济性考虑,纵、横向的正应力一般控制在相同应力水平 $\xi=1$,根据《公路钢结构桥梁设计规范》弹性屈曲系数 $k=2$,因此中横梁局部稳定折减系数在不考虑正交方向的影响为0.052,考虑正交方向影响为0.027,两者相差较大,并且可以看出由于箱梁在支点处的横向构件间距较大,横向受压翼缘稳定系数折减严重,故而在支点考虑剪力滞效应的有效宽度范围内加密隔板个数或设置横向的刚性加劲肋,有利于提高板件的利用效率,提升结构的经济性。

5 结 语

本文对比了宽幅钢箱梁在单梁法、剪力柔性梁格法及板壳单元法等不同模型下的计算精度,分析了此类结构的受力特性,对横梁的计算方法进行了探究,从而得到如下结论:

(1)对于宽幅钢箱梁,单梁模型已很难真实反应结构的实际受力状态,梁格法和板壳单元法能较好的反应结构受力状态,且梁格模型建模相对便捷,可较好的用于工程设计。

(2)梁格模型无法反应结构的泊松效应,对钢结构有一定影响,工程设计中应注意予以考虑。

(3)建议梁格模型在近横梁区域加密纵梁网格,可减少由于梁格刚度集中导致的横梁内力突变问题,并且足够细密的梁格可以直接反应结构的剪力滞效应。

(4)支点范围内纵向腹板的剪力分配不均匀效应明显,如直接采用剪力均分则与实际情况相差极大,偏危险,故此范围内的纵向腹板厚度选用应予以细分,且各腹板剪力向跨中延伸趋于平均,故跨中可采用相同的腹板厚度。

(5)对同一项目中,箱式个数、梁高及支座位置相似的结构,调整横梁顶(底)板厚度、腹板厚度,跨

径及箱式宽度等因素对腹板剪力分配不均匀系数的影响有限,其中跨径及箱式宽度有一定的影响,但位于可控范围内,对工程应用仍具有一定精度。宽幅钢箱梁采用箱形横梁及加厚支座隔板厚度可以优化剪力分配不均匀现象,但仍需关注其影响。

(6)宽幅钢箱梁的横梁除支点横梁外,近支点范围内横隔板同时承受横向整体效应产生的较大剪力,故需单独进行板件设计,如仍按常规横隔板设计,偏危险。经分析需加强隔板范围一般约为支座隔板每侧各5 m左右,且此范围受跨径影响较小。

(7)宽幅钢箱梁横梁的受力模型可简化为受集中荷载的悬臂连续梁,集中力由腹板传递。规范中所给定的考虑剪力滞的有效分布宽度对此种横梁结构不再适用,对于常规跨径及宽度的宽幅钢箱梁,建议翼缘有效总宽度取0.24倍的等效跨径,对于横梁支座间区域内横梁的有效宽度,如横向支座范围内未形成反弯点,则此范围内的翼缘有效总宽同悬臂段,采用此种简化计算方式的横梁应力略高于梁格及板壳方法,具有一定安全余量,但经济性稍差,对于工程校核及前期估算具有较好的指导意义。

(8)宽幅钢箱梁横梁的受压板件局部稳定应考虑空间受力状态,不同状态下的弹性屈曲系数相差较大,应充分考虑。在支点考虑剪力滞效应的有效宽度范围内加密隔板个数或设置横向的刚性加劲肋,是提升结构经济性的一种良好措施。

参考文献:

- [1] 戴公连,李德建.桥梁结构空间分析设计方法于应用[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [2] 兰枢灵.薄壁钢箱梁计算方法研究[D].西安:长安大学,2011.
- [3] E.C.Hambly.Bridge Deck Behaviour [M].London New York:Chapman and Hall Wiley,1976.
- [4] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [5] 平成14年,道路橋示方書·同解説[S].
- [6] 小西一郎.钢桥[M].北京:人民铁道出版社,1980.
- [7] 2017,AASHTO,LRFD Bridge Design Specifications[S].
- [8] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [9] 杜卫.正交异性钢桥面板稳定研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [10] 陈曦.钢结构稳定理论与设计[M].北京:科学出版社,2014.