

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.02.056

考虑剪力滞和局部稳定影响的钢板梁应力分析

苏坤

[上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海市 200433]

摘要: 钢板梁桥翼缘板受剪力滞效应和局部稳定的影响,其纵向应力沿横向分布是不均匀的。结合工程实例,若按初等梁理论计算平均应力结果偏小,存在安全隐患;采用有限元法模拟计算,可以精确地求得沿横向任意处的弯曲应力及其沿横向的分布情况,但建模过程复杂、工作量大;参照现行规范采用有效分布宽度的方法简化计算,结果偏于保守,可作为工程设计的参考依据。

关键词: 钢板梁;剪力滞效应;局部稳定;有限元分析;有效宽度

中图分类号: U448.21+2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)02-0197-04

0 引言

钢板梁桥通常是由钢板焊接、栓接或铆接而形成的工字形或Π形的实腹式钢梁作为主要承重结构的桥梁。因其具有构造简单、架设方便、快速等优点而被越来越多地应用于中小跨径桥梁^[1]。

为满足使用功能要求,钢板梁常采用较宽的钢板桥面板。宽翼缘钢板梁在荷载作用下,由于翼板的剪切变形致使其弯曲应力沿梁宽度方向呈现不均匀分布状态,即在纵向弯曲时产生“剪力滞后”(Shear Lag)效应^[2]。同时,由于钢板梁翼缘板板厚较薄,受压时易发生局部失稳,通常设置加劲肋,与横隔板、腹板一起形成纵横向共同受力的空间体系。被加劲肋和横隔板划分成的小区格内,钢翼缘板也会因局部变形过大而产生局部应力,和第一体系产生的应力叠加,使应力分布情况更为复杂^[3]。

若忽略剪力滞和局部稳定的影响,按初等梁理论计算平均应力,会低估箱梁的实际应力,造成结构的不安全,国内外都曾发生过由此而引起的重大事故^[2,4]。因此,在实际工程设计时,有必要对宽翼缘钢板梁剪力滞效应和局部稳定问题给予足够重视。

研究钢桥面板受压翼缘受力状况的常用方法有解析法、空间杆系模型法和数值模拟法、实验法等多种方法^[5,6]。现仅以解析法、梁格法和有限元法进行计算和对比分析。

收稿日期: 2021-05-14

作者简介: 苏坤(1988—),男,硕士,工程师,从事桥梁工程设计工作。

1 工程概况

某城市人行桥全长 14.0 m,全宽 3.8 m,人行道净宽 3.0 m,设计为简支钢板梁桥,上部结构采用焊接 Π 形钢板梁,计算跨径 13.0 m,梁高为 0.4 m,顶板厚度 10 mm,纵向设置 6 道高度为 120 mm 的板式加劲肋,腹板厚 10 mm,中心间距 2 200 mm,底板厚度 16 mm,宽度为 400 mm。沿纵向每隔 2 m 设置一道横隔板,厚度 10 mm,全桥横隔板竖向均为铅垂设置,钢板梁跨中横断面如图 1 所示。

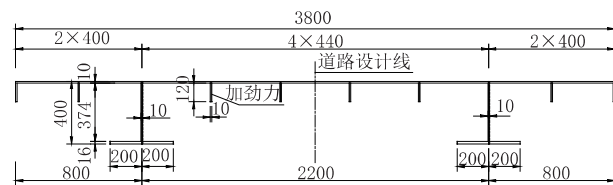


图1 钢板梁跨中横断面图(单位 mm)

钢材采用 Q235C, 容重 78.5 kN/m^3 , 弹性模量 $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$, 剪切模量 $7.9 \times 10^4 \text{ MPa}$, 泊松比 0.31, 线膨胀系数 1.2×10^{-5} 。

永久荷载包括结构自重、桥面铺装、栏杆等,按照结构构件体积乘以容重计算其标准值,其中钢结构重度取 78.5 kN/m^3 ,桥面铺装重度取值为 4.32 kN/m ,栏杆重度取为 1.96 kN/m 。可变荷载主要包括人群荷载,参照现行规范^[7],取值 4.5 kPa 。

荷载组合:根据我国现行规范^[8]对上述作用进行承载能力极限状态基本组合:永久荷载分项系数 1.2,可变荷载分项系数 1.4。

支座布置形式如图 2 所示。

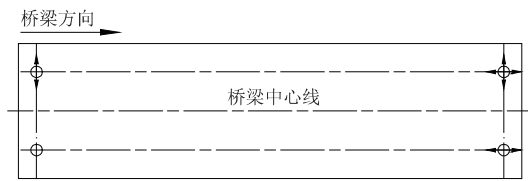


图2 支座布置示意图

2 解析法

按照梁弯曲初等理论,梁截面变形服从平截面假设,不考虑剪力滞效应和局部稳定的影响,通过解析法计算,得到单梁截面平均应力。该梁为简支结构,受力明确,按照影响线加载原则,人群荷载满布跨中时结构受力最不利,此时跨中截面竖向距中性轴 y_i 处的平均应力为:

$$\sigma = \frac{M}{W_i} = \frac{M y_i}{I} \quad (1)$$

将该桥数据代入计算得跨中截面顶缘平均压应力为 -48.2 MPa (负值表示压应力,下同)。

若考虑剪力滞效应的影响,弯曲应力沿梁宽度方向不再相等,为求得最大应力,可按照现行规范^[9]将受压翼缘采用有效宽度进行简化计算。

$$b_e^s = \sum_{i=1}^{n_p} b_{e,i}^s \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} b_{e,i}^s &= b_i, & \frac{b_i}{l} &\leq 0.05 \\ b_{e,i}^s &= (1.1 - 2\frac{b_i}{l})b_i, & 0.05 < \frac{b_i}{l} &\leq 0.3 \\ b_{e,i}^s &= 0.15l, & \frac{b_i}{l} &\geq 0.3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

有效宽度折减系数:

$$\rho = \frac{b_{e,i}^s}{b_i} \quad (4)$$

经计算,外伸肢和腹板之间的翼缘有效宽度折减系数分别为:

$$\rho_1 = 0.977, \rho_2 = 0.931$$

在考虑局部稳定的情况下,可按照规范将受压翼缘采用有效宽度折减进行简化计算。

$$\text{加劲肋宽厚比 } \frac{h_s}{t_s} = 12 \leq 12\sqrt{\frac{345}{f_y}} = 14.54$$

$$\text{单宽板刚度 } D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^3)}$$

$$\text{单根纵向加劲肋对 Y-Y 抗弯惯矩 } I_i = \frac{1}{3}t_s h_s^3$$

$$\text{纵向加劲肋的相对刚度 } r_i = \frac{EI_i}{bD}$$

$$\text{单根纵向加劲肋与模板面积之比 } \delta_i = \frac{A_{s,i}}{bt}$$

经计算,单根纵向加劲肋截面面积:

$$A_{s,i} = t_s h_s = 1200 \geq \frac{bt}{10n} = 440$$

$$\text{加劲板的长宽比 } \alpha = 0.91 \leq \alpha_0 = \sqrt[4]{1+nr_l} = 3.46$$

$$\text{则: } r_i^* = \frac{1}{n} [4n^2(1+n\delta_l)\alpha^2 - (\alpha^2+1)^2] = 20.37 \leq r_l, \text{ 满足刚性加劲肋要求。}$$

参照规范附录 B, $k=4, b_p=440$

则相对宽厚比:

$$\bar{\lambda}_p = 1.05 \left(\frac{b_p}{t} \right) \sqrt{\frac{f_y}{E} \left(\frac{1}{k} \right)} \quad (5)$$

代入数据经计算得 $\bar{\lambda}_p = 0.78 > 0.4$

$$\varepsilon_0 = 0.8(\bar{\lambda}_p - 0.4) = 0.3$$

$$\rho = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \frac{1}{\lambda_p^2} (1 + \varepsilon_0) - \sqrt{\left[1 + \frac{1}{\lambda_p^2} (1 + \varepsilon_0) \right]^2 - \frac{4}{\lambda_p^2}} \right\} = 0.662$$

以上是根据腹板之间翼缘考虑局部稳定推导的有效宽度折减系数,该钢板梁外伸部分近似取同一系数。

同时考虑剪力滞效应和局部稳定的情况下,受压翼缘可采用有效宽度进行简化计算。

$$\rho_k^s = \frac{\sum b_{e,k}^s}{b_k} \quad (6)$$

$$b_{e,k} = \rho_k^s \sum b_{e,k}^p \quad (7)$$

$$b_e = \rho_k^s \sum_{k=1}^{n_p} b_{e,k} \quad (8)$$

经计算,同时考虑剪力滞效应和局部稳定的情况下,受压翼缘采用有效宽度为:

$$b_e = [0.977 \times (132.5 + 265 + 132.5) + 0.931 \times (145.7 + 291.5 \times 2)] \times 2 = 2392 \text{ (mm)}$$

将截面宽度换算为有效宽度为 2392 mm,按式(1)重新计算,得到跨中截面顶缘弯曲应力为:

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{715.3 \times 10^6 \times (-135.4)}{1418118623} = -68.3 \text{ (MPa)}$$

3 梁格法

梁格法的思路是将腹板和翼缘板模拟成纵向受力构件,将横隔板模拟成横向受力构件,形成纵横向共同参与受力的三维空间结构体系。该桥采用 Midas civil 程序,根据构造和边界条件,建立空间杆系模型,如图3所示,全梁共计节点数量116个,单元数量120个,边界条件数量4个。

按照不考虑剪力滞效应与局部稳定的影响和考虑剪力滞效应与局部稳定的影响两种情况分别计算,截面顶缘纵向应力如图4、图5所示。

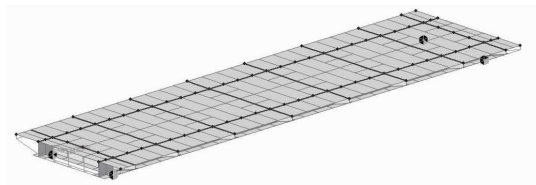


图 3 梁格法计算模型

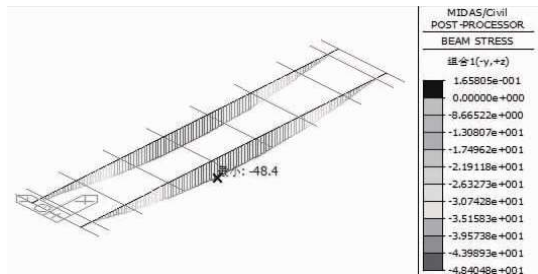


图 4 不考虑剪力滞效应和局部稳定顶缘应力图

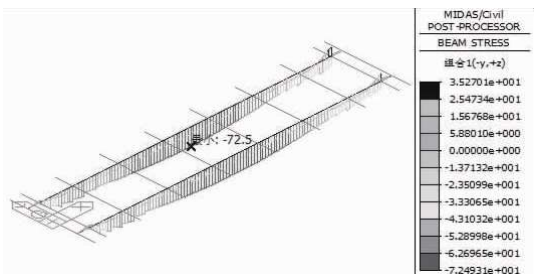


图 5 考虑剪力滞效应和局部稳定顶缘应力图

若不考虑剪力滞效应和局部稳定的影响,在荷载基本组合下,纵向受力构件跨中截面顶缘弯曲应力值 -48.4 MPa 。

考虑剪力滞效应和局部稳定影响后,在荷载基本组合下,纵向受力构件跨中截面顶缘弯曲应力值 -72.5 MPa 。

4 有限元法

有限元法的思路是将连续的结构体离散为相互联结的有限个单元,并为各个单元设定有限个节点,各个单元通过节点相互连接起来共同构成一个系统。现采用有限元分析软件 Midas FEA 对钢板梁建模和计算分析,钢板梁采用二维板单元,支座模拟采用施加与实际位置一致的边界条件,建立有限元模型,如图 6 所示。整个模型共计节点数量 6 351 个,单元数量 6 240 个,边界条件数量 4 个。

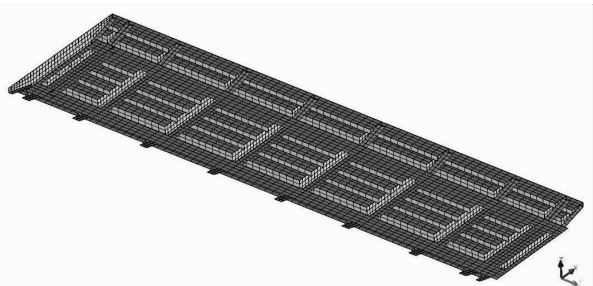


图 6 有限元法计算模型

在荷载基本组合下,钢板梁上翼缘应力云图如图 7 所示。

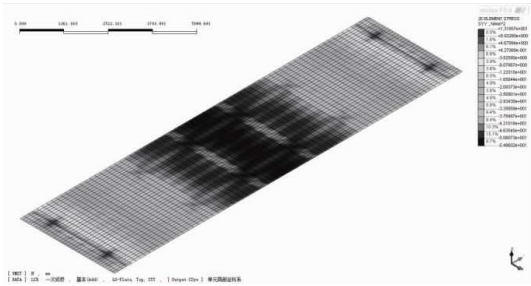


图 7 钢板梁上翼缘应力云图

提取出跨中截面顶缘应力沿横向分布情况如图 8 所示。

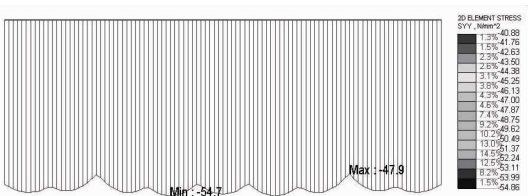


图 8 跨中截面顶缘应力沿横向分布图

由图 8 可知,采用有限元法计算,在荷载基本组合下,跨中截面顶缘正应力呈现不均匀性,最大值出现在腹板上方,为 -47.9 MPa ,最小值出现在腹板之间,为 -54.7 MPa ,均为压应力。

出现这种现象的原因,是由于钢桥面板较薄,在均布面荷载作用下,小区格内翼缘板跨中局部变形较大,出现了较大局部压应力,与从腹板剪力流传递过来的压应力叠加之后,表现为更大的压应力,甚至超过了腹板处的翼缘板压应力,出现了与正剪力滞现象刚好相反的现象。这种现象,广义上也被称为“负剪力滞”效应。

5 计算结果对比分析

将上述几种方法及其计算结果汇总于表 1。

从表 1 可以看出,采用解析法和梁格法计算结果相近,误差仅为 0.4%,可以相互佐证。但无论采用解析法还是梁格法,若不考虑剪力滞效应和局部稳定的影响,在荷载基本组合下跨中截面上翼缘板弯曲应力值均偏小,而考虑剪力滞效应和局部稳定影响并采用有效宽度方法简化计算的应力值偏大,增幅分别为 42%和 50%。采用有限单元法,在荷载基本组合下,跨中截面上翼缘板正应力呈现不均匀性,最大值和最小值相差 14%,更能反映应力分布实际情况。

从计算结果来看,采用梁格法的空间杆系模型考虑剪力滞效应和局部稳定的情况下,跨中截面上

表 1 不同方法 / 模型计算的跨中截面顶缘应力汇总表

方法	模型	计算原则	I / mm^4	y / mm	组合 $M / (\text{kN} \cdot \text{m})$	弯曲应力 /MPa
解析法	单梁模型	初等梁理论	1 607 942 178	108.3	715.3	-48.2
		考虑有效宽度	1 418 118 623	135.4		-68.3
梁格法	空间杆系模型	不考虑折减	程序自动计算		349.8	-48.4
		考虑有效宽度				-72.5
有限元法	有限单元模型	实际建模	程序自动计算		max	-47.9
					min	-54.7

翼缘板应力值最大。

6 结 论

通过以上计算分析可以得到以下结论：

(1)对于宽翼缘焊接钢板梁,按照初等梁理论计算平均弯曲应力是偏小的,低估了箱梁的实际应力,具有结构安全隐患,不宜作为设计的判别指标。

(2)采用有限元法建模,根据结构实际边界条件和受力状况,可以得到每个截面任意处的实际应力,计算结果精确,可以反映弯曲应力沿横向的分布情况,但建模程序复杂,运算量大,时间成本较高。

(3)将考虑剪力滞效应和局部稳定影响等因素的计算转化为有效分布宽度的计算,采用空间杆系模型简化计算截面应力,计算结果偏于保守,但满足工程精度要求,既保证了结构的安全可靠,又节省了时

间、提高了工作效率,且符合规范要求,可作为工程设计的依据。

参考文献:

[1] 吴冲.现代钢桥[M].北京:人民交通出版社,2006.

[2] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2001.

[3] 王欣南,受压开口肋加劲板稳定承载力数值模拟[J].中外公路,2014, 34(6):168-170.

[4] 秦雪涛.人行天桥钢箱梁剪力滞效应分析研究[D].重庆:重庆交通大学,2009.

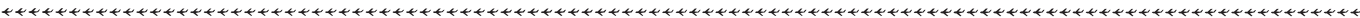
[5] 郭金琼,房贞政,罗孝登.箱形梁桥剪滞效应分析[J].土木工程学报, 1983(1):1-13.

[6] 张士铎,平板结构中翼缘的负剪力滞效应[J].长沙交通学院学报, 1992(9):8-13.

[7] CJJ 11—2011,城市桥梁设计规范[S].

[8] JTG D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].

[9] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁规范[S].



《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com