

大跨分离式钢箱梁设计要点研究

朱雪光, 曹东利, 曹 跃

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100082)

摘 要: 为适配交通基础设施大跨度、高标准建设需求, 结合钢结构桥梁跨越能力强、工业化程度高、施工周期短的优势, 依托深圳市 72 m+118 m+72 m 变截面连续钢箱梁桥工程, 开展设计要点与关键技术研究。通过阐述项目背景、工程概况及三箱单室分离式断面总体设计构思, 聚焦钢结构局部稳定控制核心问题, 完成刚性加劲肋选型设计与验算, 定量计算顶底板受压区局部稳定折减系数及剪力滞效应影响值; 针对中支点高腹板受力复杂特性, 优化纵横向加劲肋布置方案并开展力学效应分析与稳定验算; 探讨正交异性桥面板疲劳破坏机制, 分析板件连接方式对疲劳性能的影响并完成多模型疲劳验算。研究成果为同类大跨度连续钢箱梁桥设计提供技术参考, 保障结构安全与工程适用性。

关键词: 钢箱梁桥; 设计要点; 强度验算; 局部稳定; 疲劳验算

中图分类号: U442.5; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0227-04

Research on Key Design Points of Long-span Separated Steel Box Beams

ZHU Xueguang, CAO Dongli, CAO Yue

(Beijing Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: To meet the requirements of long-span and high-standard construction of transportation infrastructure, combined with the advantages of steel structure bridges such as strong spanning capacity, high industrialization level and short construction period, and relying on a 72 m+118 m+72 m variable-section continuous steel box beam bridge project in Shenzhen, the key design points and key technologies are studied. By elaborating the project background, engineering overview, and the overall design concept of the three-box single-cell separated cross-section, and focusing on the core issue of local stability control of steel structures, the selection design and verification of rigid ribbed stiffeners are completed, and the local stability reduction coefficient of the compressed zones of the top and bottom plates as well as the influence value of the shear lag effect are quantitatively calculated. Aiming at the complex stress characteristics of the high web plate at the middle support, the layout scheme of longitudinal and transverse ribbed stiffeners is optimized, and its mechanical effect analysis and stability verification are conducted. Additionally, the fatigue failure mechanism of the orthotropic deck is discussed, the influence of plate connection methods on fatigue performance is analyzed, and the multi-model fatigue verification is completed. The research results provide the technical references for the design of similar long-span continuous steel box beam bridges, ensuring the structural safety and engineering applicability.

Keywords: steel box beam bridge; key design points; strength check; local stability; fatigue check

0 引 言

中国公路交通产业近几年高速发展, 累计桥梁达到 70 多万座, 但钢结构桥梁所占比例不到 1%, 发达国家一般占到 30% 左右, 与我国政策和技术等因素有着千丝万缕的联系, 在去产能的大背景下, 加快供给侧改革, 倡导双碳理念, 钢结构桥梁成为现阶段我国桥梁结构发展的必然趋势^[1-2]。

收稿日期: 2025-12-24

作者简介: 朱雪光(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁总体设计工作。

通信作者: 曹东利(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事钢结构桥梁设计工作。

与传统预应力混凝土箱梁相比, 钢材具有较高的强度、材料均匀、塑性和韧性好、可焊性好等优点, 具有显著的优越性: (1) 钢构件的强度高, 板件截面小, 自重轻, 适合在大跨径桥梁上建造; (2) 适用于工业化程度较高的装配式制造; (3) 便于运输, 便于安装和缩短工期; (4) 易于修复更换钢桥。

本文借鉴国内外钢箱梁设计、施工经验, 结合钢箱梁桥受力特点, 提出大跨钢箱梁设计中的重点关注问题, 并依托实际工程, 完成全桥稳定性设计验算, 分析计算局部稳定问题(如受压加劲板的局部稳定折减、剪力滞效应折减、腹板局部稳定等), 简述正交异性桥面板疲劳问题并按现行规定验算, 总结该

桥设计特点与计算结论,为桥梁工程师提供参考。

1 工程概况

深圳市某跨线桥为 72 m+118 m+72 m 变截面连续钢箱梁结构,图 1 为方案效果图。为提升纵向整体刚度和承载能力,采用三箱单室断面,设置六道腹板。



图 1 方案效果图

顶板的总宽度为 18 m,两侧各有 2.5 m 的悬臂,单个箱体的宽度为 3 m,断面如图 2、图 3 所示。为节约钢材、减轻自重,采用变厚腹板设计:腹板在中间支点两侧一定范围内各厚 22 mm,其余位置各厚 18 mm;底板变厚的面积和板件厚度都与腹板吻合。顶板使用厚度为 22 mm 的正交异形钢桥面板,横隔板的标准间距为 4 m,并设置圆形人孔以提高掏空率。

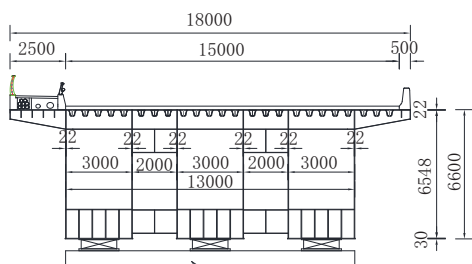


图 2 支点断面(单位:mm)

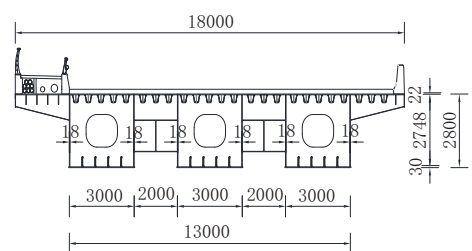


图 3 跨中断面(单位:mm)

中跨跨中和边支点梁高均为 2.8 m,中支点梁高 6.6 m,高跨比约 0.05 ($L/20$)。变截面处对比二次抛物线和 1.8 次抛物线,发现跨中 1/4~1/5 截面附近两者最大高差 17 cm,但对整体梁高影响不明显,结合减轻自重、节约钢材和现场运输等因素,最终采用二次抛物线。

2 模型建立

2.1 整体计算

总体纵向计算采用平面杆系理论,利用 MIDAS

Civil 2025 有限元程序建立空间模型,主梁采用空间梁单元,全桥共 101 个节点、100 个单元,按荷载组合要求计算内力、应力和变形,模型如图 4 所示。

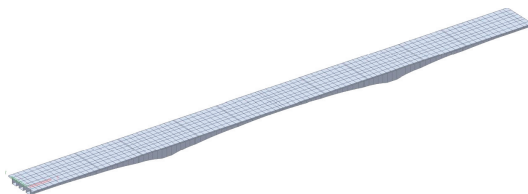


图 4 总体计算模型

2.2 加劲肋设计

为保证板件的局部稳定性,加劲板宜采用刚性加劲肋,使其局部破坏晚于整体破坏。只有在构造布置困难或受力较小时,才可用柔性加劲肋。对于刚性加劲肋,可以近似认为:当板件失稳时,加劲肋处不发生变形,加劲肋可以简化为简支边计算加劲板的弹性屈曲。当采用柔性加劲肋时,在压力作用下,加劲肋会与翼缘板共同失稳,降低板件的抗压承载力。

当刚性加劲肋计算局部稳定折减系数(纵向相对刚度比较系数) ≥ 1 时,判定纵向加劲肋为刚性;板件失稳时可采用刚性加劲,使板件不易变形时,可将其作为约束点使用刚性加劲肋^[1-2]。在进行板件局部分析时,应不断对各区域板件的板厚、间距、加强肋尺寸、加强肋间距等进行优化,以求板厚、加强肋尺寸等条件最适合设计所需。同时在宽厚比例上要达到加劲的要求。

本桥翼板处采用 25×350 mm I 形肋,I 形肋间距 500 mm;箱室顶板采用厚度 $t=8$ mm,宽 $b_s=150$ mm,高度 $h_s=300$ mm 的闭口 U 形加劲肋,U 肋间距 600 mm,均为刚性加劲肋。

2.3 剪力滞效应折减

为了简化计算,在工程设计中一般假定截面符合平截面的假定^[3],但由于剪力滞效应的影响,截面实际应力分布不均匀,因此,应考虑钢箱梁剪力滞的影响系数,即有效宽度折减系数^[4]的计算,按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)第 5.1.8 条计算,即截面有效宽度和面积,如图 5 所示,以仅考虑剪力滞效应的有效分布宽度计算结果,即截面实际应力分布不均匀,应考虑受压板件局部稳定折减,即应考虑到截面剪力滞的影响。

2.4 考虑双折减计算结果

在计算软件中以有效宽度体现受压翼缘有效宽度,在考虑中支点附近的剪力滞折减^[5],得到最终有效宽度折减系数的同时保证设计,并考虑剪力滞和

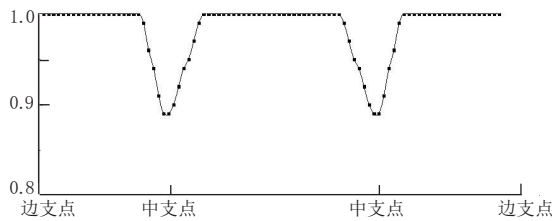


图5 剪力滞系数折减分布

局部稳定影响,对其他截面进行线性内插计算。计算得到的应力为折算截面所受的应力,应力计算结果如表1所示,挠度计算结果如表2所示。

表1 应力计算结果

单位:MPa

关键参数	上缘最大压应力	下缘最大压应力	上缘最大拉应力	下缘最大拉应力
标准组合	-83	-105	99	122

表2 挠度计算结果

单位:mm

工况	自重	汽车荷载	计算位移 (自重+0.5汽车)	允许位移 (L/500)
最大位移	-0.193	-0.044	-0.215	-0.236

3 腹板局部稳定设计

3.1 设计思路

对于这种变高钢箱梁而言,腹板受力状态相当复杂,既要承受由剪力和扭力所产生的剪应力,又要承受由弯矩所产生的弯曲应力和由轴力所产生的压应力,从而更容易造成钢箱梁腹板的局部稳定性问题^[6]。采用设置加劲肋的方式,在腹板厚度按有关规范要求通过总体强度计算确定后,增强腹板的稳定能力。

设置加劲肋的意义在于将腹板划分为不同网格,每个网格均能满足要求,才能确保不发生腹板局部屈曲^[7]。对于钢箱梁腹板而言,依弯矩与剪力分布状况可知,以剪力作用为主的网格靠近梁端,而以弯曲正应力作用为主的网格跨中附近,常有正应力与剪力共同作用的网格与其他网格。

其中,横向加劲肋的作用主要是防止腹板剪切不稳定,防止应力集中^[8];纵向加劲肋的主要作用是在弯曲和受力的作用下,防止腹板产生弯曲和不稳定现象。

3.2 局部稳定验算

腹板稳定主要受腹板厚度、加劲方式、隔板间距等因素影响,各因素通过改变腹板的受力分布或抗屈曲能力,直接决定腹板的稳定形态。

由图6、图7的计算结果可知,承载力极限状态的基本组合正应力计算结果为最大拉应力122 MPa,最大压应力116 MPa;剪应力的计算结果是最大剪应

力,为20 MPa。

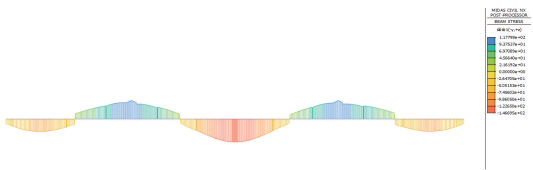


图6 承载力极限状态基本组合正应力结果(单位:MPa)

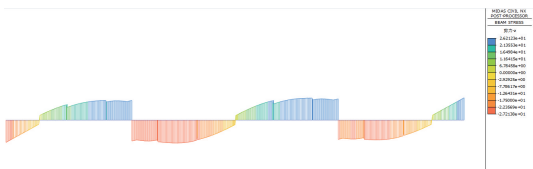


图7 承载力极限状态基本组合剪应力结果(单位:MPa)

在受压区腹板局部稳定验算中,以上述计算结果为基础,分别在腹板中部支点处各设2条纵肋,腹板跨中部各设1条纵肋,最终得出表3、表4中的计算结果。

表3 中支点处腹板(设两道纵肋)局部稳定简化验算

关键参数	数值	是否满足
腹板计算高度/mm	6 548	满足
腹板厚度/mm	30	满足
横向加劲肋间距/mm	2 000	满足
腹板稳定验算系数	0.047	满足
横向加劲肋刚度验算系数	1.207	满足
纵向加劲肋刚度验算系数	2.156	满足

表4 跨中处腹板(设一道纵肋)局部稳定简化验算

关键参数	数值	是否满足
腹板计算高/mm	2 753	满足
腹板厚度/mm	25	满足
横向加劲肋间距/mm	2 000	满足
腹板稳定验算系数	0.014	满足
横向加劲肋刚度验算系数	2.769	满足
纵向加劲肋刚度验算系数	2.790	满足

4 正交异性板疲劳设计

4.1 疲劳设计理论

钢桥的疲劳破坏是由于缺陷局部的细微裂纹的形成和发展,最终发生脆性破坏的现象^[9-10],是在强度极限以下的重复荷载作用下发生的。疲劳破坏的主要原因是在复交变荷载的作用下,裂缝持续扩展,钢板的截面逐渐减弱,裂纹根部出现应力集中,从而导致板件承受三向拉应力,限制了塑性变形的发生。在经历了一定次数的循环荷载后,材料会突然出现脆性断裂^[11]。

钢桥面板疲劳性能除与钢材自身初始状态和荷载应力幅有关,也与纵肋与横隔板的交叉布置方式有关^[12]。最佳的做法是保持纵肋的连续性,同时在纵肋的位置开孔以安装横隔板;如果纵肋被断开,而横隔板

保持完整连续,则疲劳细节的数值将减少近一半^[13]。
因此,本桥采用纵肋连续的做法,如图8所示。



图8 纵肋连续做法

4.2 疲劳模型一验算

疲劳模型一(等效车道荷载)根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)的相关规定分别进行分析,在表5中总结了验算结果。

表5 疲劳模型一简化验算					单位:MPa
类型	最大应力	最小应力	应力幅	限值	是否满足
正应力	5.68	-13.15	18.83	45	满足
剪应力	1.98	-1.98	3.96	40	满足

模型一满足要求,可不验算模型二。

4.2 疲劳模型三验算

正交异性桥面系疲劳效应验算的核心规定围绕疲劳荷载模型选择、应力计算方法、横向位置概率三大维度展开。计算使用MIDAS Civil 2025进行板壳单元建模,顶板、U肋、隔板、横肋、腹板均采用板单元模拟,对隔板和腹板底部进行固定约束^[14]。

正交异性桥面板的疲劳特性对车轮荷载非常敏感,并且各疲劳特征的有效影响区域狭小,变化幅度大^[15-16],因此需要关注车轮横向位置的影响。

车辆荷载如图9、图10所示。

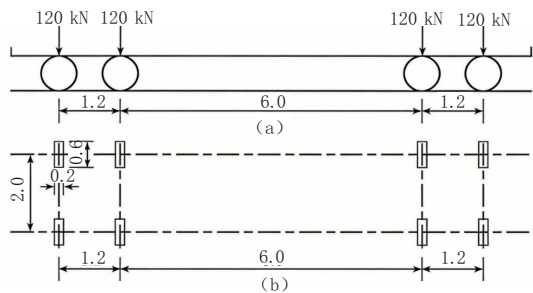


图9 车辆荷载图示

经空间板壳单元分析,疲劳模型三作用下应力云图如图11所示,同时计算得到表6的疲劳模型三车辆荷载下正交异性桥面板的疲劳验算结果。

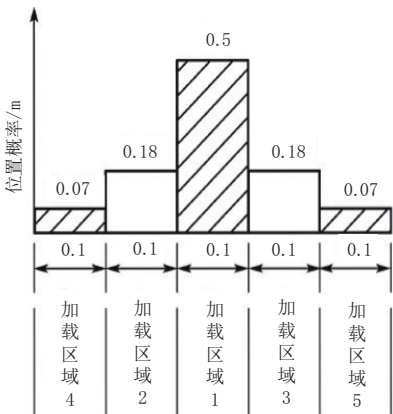


图10 车轮侧向加载位置

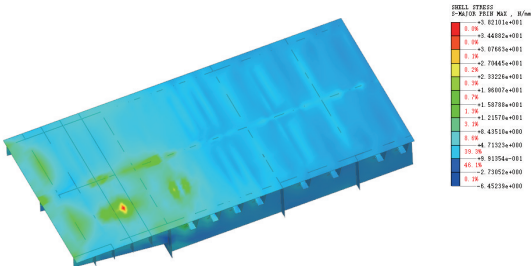


图11 疲劳模型三作用下应力云图(单位:MPa)

表6 疲劳模型三验算		
关键参数	数值	是否满足
正应力幅/MPa	45.20	满足
剪应力幅/MPa	25.20	满足
损伤等效系数	2.97	满足
等效正应力幅限值/MPa	70	满足
等效剪应力幅限值/MPa	70	满足

5 结 论

本文以72 m+118 m+72 m变截面连续钢箱梁桥为研究对象,通过MIDAS Civil有限元模拟与规范验算,系统完成设计要点分析,核心结论如下:

采用提升整体刚度的三箱单室截面和六个腹板、变厚腹板(中间支点22 mm,剩余18 mm)和二次抛物线变截面过渡,使受力合理性和经济性达到平衡。

局部稳定控制成效显著,通过刚性加劲肋(翼板I形肋、顶板U形肋)设计,结合局部稳定折减(跨中顶板0.83、支点底板0.94)与剪力滞效应折减计算,有效抑制板件局部屈曲。

高腹板稳定设计可行,中支点处设两道纵肋、跨中处设一道纵肋,搭配横向加劲肋的差异化方案,经验算满足《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)要求,解决了支点区域腹板高度大的稳定难题。

经多种疲劳模型验算,正交异性桥面板疲劳性能达标,采用纵肋连续构造,正应力幅值和剪应力幅值均小于规范限值,保证了长时间作业的安全性。

(下转第235页)