

Three-Dimensional Analysis of Wide Box Girder with Curved Bottom Steel Structure of Viaduct

Xiaogang Ma

Shanghai Pudong Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai
Email: maxiaog77@163.com

Received: Jun. 23rd, 2020; accepted: Jul. 20th, 2020; published: Jul. 27th, 2020

Abstract

Considering the beauty of viaduct, the curved bottom box girder section is adopted. The steel box girder structure has wide deck, large width span ratio, large transverse support spacing and complex stress form. Through the establishment of finite element plate element model, the three-dimensional analysis of the bridge structure is carried out in order to master the structural stress characteristics to guide the design. According to the results of calculation and analysis, it can be concluded that: 1) The web near the bearing of the bridge is more stressed than other webs, so it needs to be thickened and analyzed for local stability. 2) Under the action of load, there is shear lag in the flange plate, especially in the small span structure. When calculating the normal stress of the flange plate, the steel plate should be reduced according to the effective width. 3) The outermost side plate of the closed box chamber is under greater stress, so it should be designed as the section web. 4) Due to the large distance between the transverse fulcrum of the bridge, the lateral stress characteristics of the structure near the long-span fulcrum and the whole span structure of the small-span bridge are obvious, so the transverse rib system should be added to strengthen the lateral stiffness of the structure. 5) The roof and bottom plate at the support position are subjected to the longitudinal and transverse stresses of the bridge, so the corresponding structure should be strengthened in the design, and the site weld should avoid the most unfavorable stress position. 6) Under the action of live load distributed force and concentrated force, the phenomenon of shear lag also appears in the middle of span flange, so the width of slab should be reduced in design. 7) If the plane bar system model is adopted in the design, the load increase factor of 1.3 for the middle fulcrum and 1.15 for the middle span should be considered to ensure the safety and reliability of the structure.

Keywords

Viaduct, Steel Box Girder, Plate Element Model, Three-Dimensional Analysis

高架桥弧形底钢结构宽箱梁空间受力分析

马晓刚

文章引用: 马晓刚. 高架桥弧形底钢结构宽箱梁空间受力分析[J]. 土木工程, 2020, 9(7): 667-673.
DOI: 10.12677/hjce.2020.97071

上海浦东建筑设计研究院有限公司，上海
Email: maxiaog77@163.com

收稿日期：2020年6月23日；录用日期：2020年7月20日；发布日期：2020年7月27日

摘要

高架桥考虑美观采用了弧形底箱梁断面，该钢箱梁结构桥面较宽，宽跨比大，横桥向支撑间距大，受力形式复杂，通过建立空间有限元板单元模型，对桥梁结构进行空间受力分析，以总体把握结构受力特点指导设计。根据计算分析结果可以得出结论：1) 该桥支座附近的腹板比其它腹板受力大，设计时需进行加厚处理，并进行局部稳定分析。2) 荷载作用下，翼缘板有剪力滞现象，其中小跨径结构更为明显，在计算翼缘板正应力时需按有效宽度进行折减。3) 封闭箱室的最外侧边板受力较大，应作为断面腹板进行设计。4) 由于桥梁横向支点间距较大，大跨径支点附近结构及小跨径桥整跨结构横向受力特征均较为明显，需增设横肋系统以加强结构横向刚度。5) 支座位置处顶板、底板均受纵、横桥向两个方向应力作用，需在设计时对相应构造进行加强并使现场焊缝避开最不利受力位置。6) 在活载均布力和集中力作用下跨中翼缘也出现剪力滞现象，设计时应注意对板宽进行折减。7) 若采用平面杆系模型设计时，桥梁中支点应考虑1.3的荷载增大系数，跨中应考虑1.15的荷载增大系数，以确保结构安全可靠。

关键词

高架桥，钢箱梁，板单元模型，空间分析

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

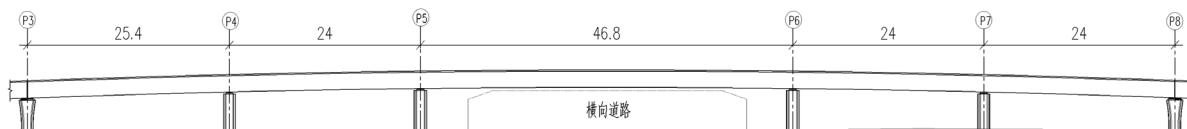
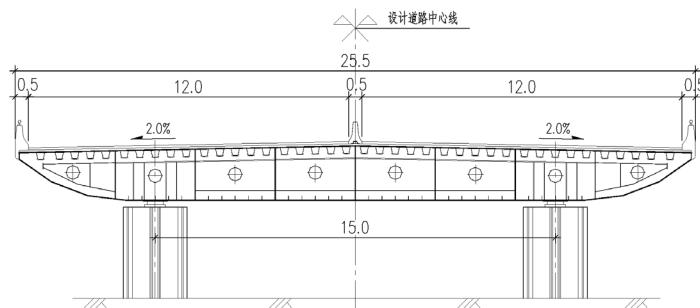
1. 概述

城市高架桥一般体量较大、墩柱密集，为使桥梁结构能与地域环境相和谐，需要进行景观设计，弱化结构线条强度减少厚重感，其中弧形底箱梁结构，由于在底板采用了曲线，使得梁体更显轻盈，较为美观，适用于宽度较宽的桥梁上部结构。某城市高架桥经多方案比选全线采用了弧形底箱梁结构断面，考虑工程位于城市核心区的重要交通节点处，选用了能分段预制拼装的钢结构方案以尽可能降低对现状道路通行的影响，缩短工期。

受工程边界条件影响跨路口桥梁跨径布置为 $(25.4 + 24 + 46.8 + 24 + 24)$ m，总体布置立面图见图1。该弧形底钢箱梁结构，桥面较宽，边跨跨径较小，结构宽跨比大，墩顶横桥向支撑间距较大(图2)，受力形式复杂，需总体把握结构受力特点并采用合理的设计分析模型，以保证该钢结构桥梁经济合理、安全可靠。

2. 技术标准

- 1) 建设标准：城市主干路I级；
- 2) 荷载等级：汽车荷载城—A级；
- 3) 设计安全等级：一级；
- 4) 设计使用年限：100年。

**Figure 1.** Elevation of steel box girder bridge**图 1. 钢箱梁桥立面图****Figure 2.** Section of steel box girder bridge**图 2. 钢箱梁桥断面图**

3. 结构构造

考虑景观，钢箱梁截面设计为弧形底断面，单箱八室全封闭结构，结构总宽 25.2 m，腹板间距 3 m，按箱梁支座中心线处梁高均为 1.90 m 的等截面连续梁设计，箱梁每隔 6 m 设一道厚 12 mm 的大横隔板，大隔板间每隔 2.0 m 设有加强桥面系刚度的小横隔板，小横隔板间设有腹板竖向加劲肋；桥面板为正交异性板结构，顶板厚 16 mm，用 8 mm 厚 U 型肋加劲，间距 560~600 mm；底板采用板型加劲肋，间距 360~375 mm；腹板最小厚 12 mm，采用平钢板进行纵横向加劲，水平加劲肋设置根据计算确定；各箱室内的隔板上均开有人孔。桥面 2% 横坡由箱梁顶板形成，底板水平，腹板铅垂。每一横梁处横桥向设置两个支座，支座间距 15 m。

4. 建模分析

由于桥面较宽，且为弧形底截面，支座横向间距大，一般设计中所采用的梁单元模型无法准确模拟结构的空间受力特性，有可能造成设计成果偏离结构实际受力需要，引起结构板件的设计过于保守或局部不满足要求，因此建立三维板壳单元模型进行分析研究，掌握结构实际受力状态。

4.1. 空间有限元板单元模型

用桥梁专用有限元分析软件 Midas Civil 建立板壳单元模型，进行空间有限元分析。由于该模型主要是了解结构主要板件的受力特点，因此腹板及横隔板的加劲肋等板件未建入模型，而是以荷载形式计入结构自重，支座采用刚性连接方式将支撑节点与支座范围内的底板进行连接以消除局部应力集中现象，板单元模型局部见图 3。恒载按照设计位置及荷载集度进行面荷载加载，活载按照影响线将规范汽车荷载模拟为静力荷载进行最不利位置的布载。

4.2. 恒载工况

4.2.1. 顺桥向正应力

分别取大跨径的中支点、跨中以及小跨径的中支点位置读取恒载工况下的顺桥向正应力，应力按横桥向节点位置绘制在结构断面上，以下以顶板应力结果为例说明结构受力特征，应力图形结果见图 4。

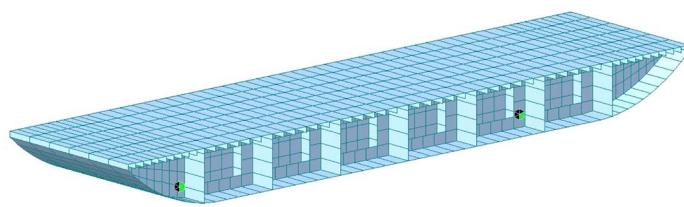


Figure 3. Local model of steel box girder plate element
图 3. 钢箱梁板单元局部模型

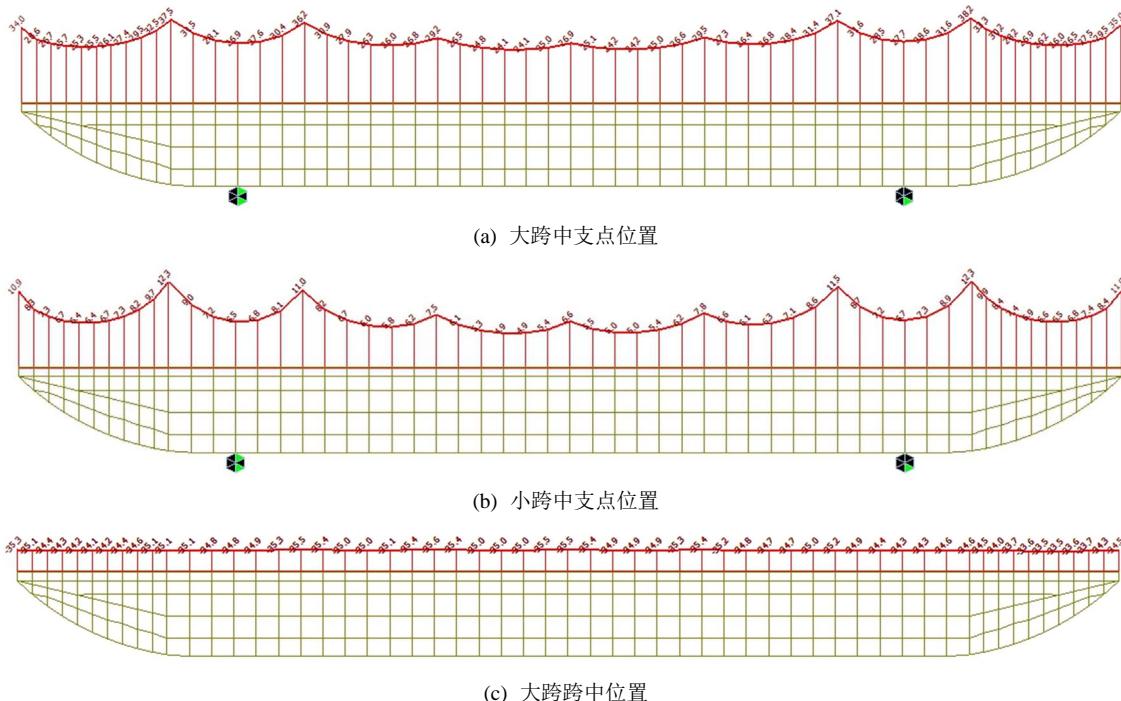


Figure 4. Distribution of normal stress along transverse direction of bridge
图 4. 正应力横桥向分布图

从图 4(a)与图 4(b)可看出, 顶板恒载顺桥向正应力沿横桥向呈波浪状, 显示出顶板在腹板位置有剪力滞后现象, 支点位置顶板在靠近支座的两个腹板处的应力值最大, 其中大跨支点腹板位置处最大最小纵向应力相差约 40%, 小跨支点相差约 80%, 说明支座附近的腹板在结构纵向传力上比其它腹板作用更大, 需与其它腹板区别设计, 也由于支座处腹板传递剪力较其它腹板大, 因此该处的顶板剪力滞后效应更加明显, 其中图 4(a)显示支座附近腹板两侧的顶板正应力由 38.2 MPa 变化至 27.7 MPa, 变化幅度 38%, 而结构中心处的腹板两侧顶板正应力仅由 26.9 MPa 变化至 24.2 MPa, 变化幅度 11%; 图 4(b)同样显示出该受力特征, 但腹板两侧应力变化幅度更大, 说明小跨径结构较大跨径结构有更显著的剪力滞后现象, 在计算翼缘板正应力时需对翼缘板宽度进行更大比例的折减, 这与规范[1]计算翼缘有效宽度的公式所揭示的规律是一致的。

从图 4(a)与图 4(b)还可看出, 结构最外侧的边板顶也表现出剪力滞现象, 说明最外侧封闭箱室对侧板起了较大的支撑作用, 使得侧板表现出明显的纵向受力特征, 因此在结构设计时该侧板与通常钢梁悬臂结构的侧板受力不一样, 应作为断面腹板进行加强设计。

从图 4(c)可以看出, 跨中位置顶板应力横向分布均匀, 说明跨中不存在翼缘板的剪力滞现象, 恒载工况下可以取钢板全宽进行验算。

4.2.2. 结构变形横桥向分布特征

分别取大跨径的中支点附近、跨中位置读取恒载工况下的顺桥向正应力，应力按横桥向节点位置绘制在结构断面上，以下同样以顶板应力结果为例说明结构变形特征，位移图形结果见图5。

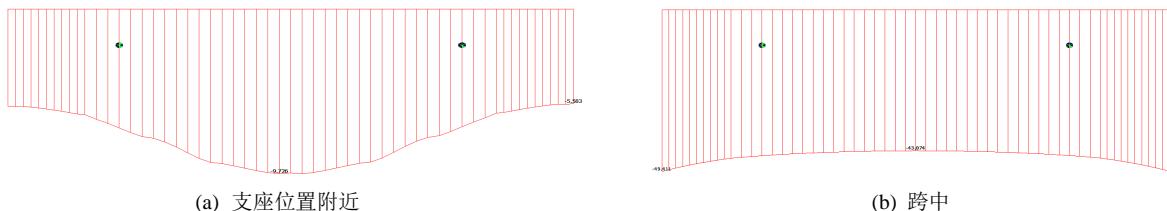


Figure 5. Distribution of displacement along transverse direction of bridge

图5. 位移横桥向分布图

从图5看，顶板在恒载作用下，跨中截面处位移沿横桥向分布比较均匀，同一截面处位移横向变化较小，支座位置附近支座之间的顶板较支座处有较大竖向位移，说明受支点间距较大以及支座约束影响结构呈现出横向受力变形特征，因而纵桥向不同截面位移变化大，顶板最大恒载竖向位移约4 mm，墩顶横隔板设计时需考虑该横向受力因素的影响，可通过增设横肋系统以加强结构横向刚度。

4.2.3. 横桥向应力的纵向分布特征

为考察全桥结构横向受力情况，在模型中读取翼缘板件横桥向应力结果，并分别将应力结果在结构中心线及支座位置处的全桥纵剖面上绘制出，应力图形结果见图6。

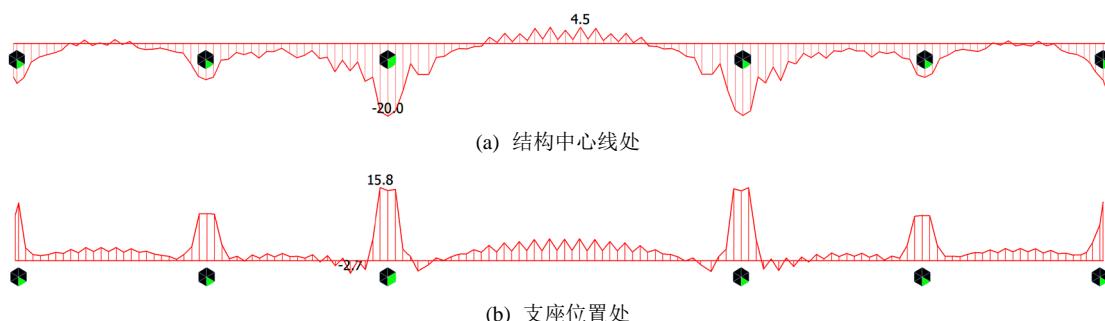


Figure 6. Distribution of transverse stress along bridge span

图6. 横桥向应力沿桥跨分布图

从图6可以看出，横桥向正应力最大值位于大跨支点横梁处，其中横梁跨中最大压应力为20 MPa，横梁支点最大拉应力为16 MPa，显示出横向受力特征，且与纵向应力相比横向应力较大；除横梁附近外顶板横向应力在大跨跨中沿桥跨方向分布较均匀且两个位置均为受拉，说明结构以纵向受力为主，而在小跨径结构处两个剖面位置的应力均为拉、压相反受力状态，说明该部分桥梁因宽跨比比较大，使得整跨结构横向受力特征较明显。

对于支点横梁，支座位置处顶板受两个方向拉应力作用，同理底板则受两个方向压应力作用，拉应力使顶板焊缝处于受力不利状态，压应力对板件局部稳定产生不利影响，均需在设计时对构造进行加强处理并使现场焊缝避开最不利双向受力位置。

4.3. 活载工况

对于箱梁结构活载加载时同样会引起翼缘板的剪力滞现象。当在工程上采用平面杆系有限元法进

行结构的简化分析时，一般需考虑活载偏心作用时荷载横向分布影响的增大系数[2]，因此以下对活载进行居中满载及半幅偏载布置，以考察结构活载剪力滞影响以及适用于杆系模型分析时的荷载增大系数。

4.3.1. 居中加载顺桥向正应力结果分析

根据结构支点及跨中位置的活载影响线，对活载进行居中满载布置，分别取大跨径的中支点、跨中位置读取静活载工况下的顺桥向正应力，应力按横桥向节点位置绘制在结构断面上，同样以顶板为例说明结构受力特征，应力图形结果见图7。

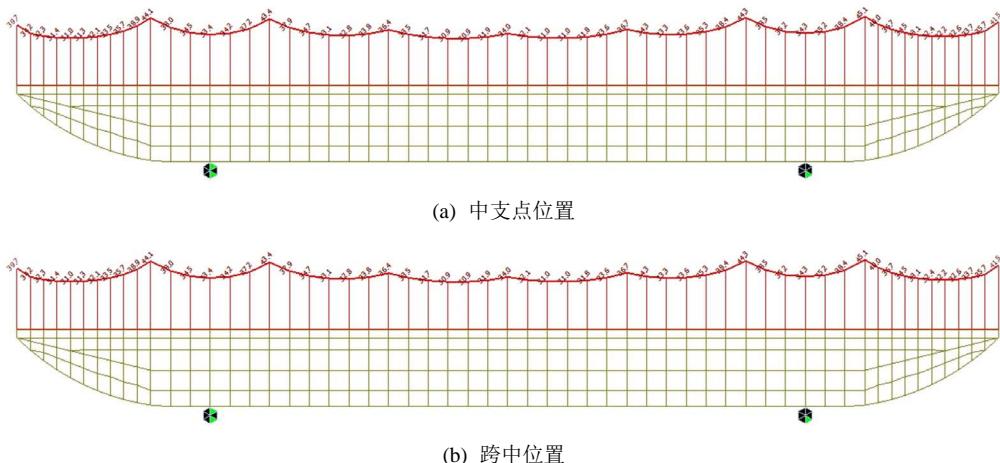


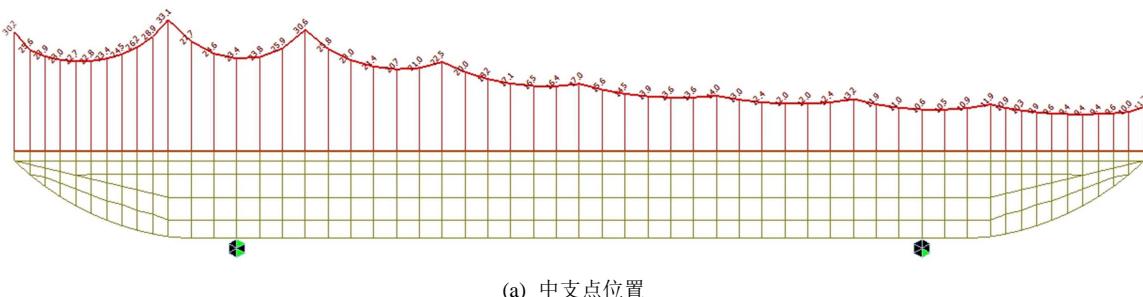
Figure 7. Distribution of normal stress along transverse direction of bridge under symmetrical loading
图 7. 对称加载正应力沿横桥向分布图

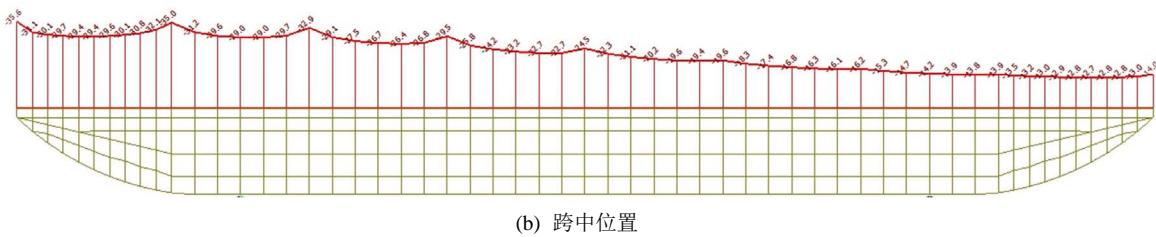
从图7可以看出，支点位置顶板剪力滞现象具有与恒载加载相似的规律，也表现为靠近支座的两道腹板顶的翼缘应力变化更大，最大最小纵向应力相差33%，较恒载加载时变化幅度小；与恒载加载不同的是跨中位置也存在这一现象，应力变化幅度约13%，说明在活载均布力和集中力作用下对跨中剪力滞有一定影响，设计时应注意对板宽进行折减。

需要指出的是，以上计算结果为六车道加载工况，根据通用规范[3]，需考虑0.55的横向车道布载系数，因此图5中支点位置顶板最大应力应为24.8 MPa(受拉)，平均应力为19.3 MPa，跨中位置顶板最大应力应为-26.8 MPa(受压)，平均应力为-24.4 MPa。

4.3.2. 偏载加载顺桥向正应力结果分析

对活载半幅偏载布置，分别取大跨径的中支点、跨中位置读取静活载工况下的顺桥向正应力，应力按横桥向节点位置绘制在结构断面上，顶板应力结果图形见图8。





(b) 跨中位置

Figure 8. Distribution of Normal stress along transverse direction of bridge under asymmetric loading
图 8. 不对称加载正应力沿横桥向分布图

从图 8 可以看出, 位于荷载偏向加载一侧的腹板处的顶板同样具有剪力滞现象出现, 支座处腹板附近最大最小纵向应力相差 41%, 与恒载加载时接近; 跨中位置同样出现了剪力滞现象, 应力变化幅度约 20%, 比图 7 的居中加载变化幅度大, 说明偏载时对跨中剪力滞影响更大, 设计时应注意对板宽进行折减。

以上计算结果为三车道加载工况, 根据通用规范[3], 需考虑 0.78 的横向车道布载系数, 因此图 8 中支点位置顶板最大应力应为 25.8 MPa, 跨中位置顶板最大应力应为 27.3 MPa。与居中布载时的平均应力相比, 本桥采用杆系模型时支点应考虑 1.3 的荷载增大系数, 跨中应考虑 1.15 的荷载增大系数。

5. 结论

根据以上建模计算分析, 可得出以下结论:

- 1) 支座附近的腹板在结构纵向传力上比其它腹板作用更大, 具体设计时需对该处腹板进行加厚处理, 并进行局部稳定分析。
- 2) 在恒载和活载工况下, 腹板位置的翼缘板有剪力滞现象, 其中小跨径结构表现更为明显, 在计算翼缘板正应力时需对钢板宽度进行不同比例的折减, 有效宽度计算公式可参考规范[1]。
- 3) 封闭箱室的最外侧边板也表现出明显的纵向受力特征, 因此在结构设计时该侧板也应作为断面腹板进行设计。
- 4) 从结构变形和横向应力看, 桥梁横向支点间距较大, 指点附近结构呈现出横向受力特征, 小跨径桥因宽跨比比较大, 使得整跨结构横向受力特征均较为明显, 因此需增设横肋系统以加强结构横向刚度。
- 5) 对于支点横梁, 支座位置处顶板、底板均受纵、横桥向两个方向应力作用, 对顶板焊缝、底板板件局部稳定会产生不利影响, 均需在设计时对相应构造进行加强处理并使现场焊缝避开最不利双向受力位置。
- 6) 与恒载加载结果不同, 在活载均布力和集中力作用下跨中也出现剪力滞现象, 设计时应注意对板宽进行折减。
- 7) 本桥若采用平面杆系模型设计时, 中支点应考虑 1.3 的荷载增大系数, 跨中应考虑 1.15 的荷载增大系数, 以确保结构安全可靠。

参考文献

- [1] 中交公路规划设计院有限公司. JTG D64-2015. 公路钢结构桥梁设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [2] 邵旭东, 程翔云, 李立峰. 桥梁设计与计算[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [3] 中交公路规划设计院有限公司. JTG D60-2015. 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.