

# Analysis of Spatial Internal Force of Deformed Steel Box Girder Bridge

Zhiyin He<sup>1</sup>, Dejian Li<sup>2</sup>, Heng Ma<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Duyun Highway Management Department of Guizhou Province, Duyun Guizhou

<sup>2</sup>School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan

Email: \*maheng0731@163.com

Received: Mar. 11<sup>th</sup>, 2017; accepted: Mar. 28<sup>th</sup>, 2017; published: Mar. 31<sup>st</sup>, 2017

---

## Abstract

In order to conform to the trend line, all kinds of deformed bridges appear constantly. Because of its superior production, installation and appearance, special-shaped steel box girder is more and more popular. At present, there are still many deficiencies in the simplified analysis method of the stress characteristics of the deformed bridge structures, so it is necessary to accurately analyze the stress characteristics of this bridge. This paper uses the plate unit of Midas/Civil to build a model of deformed steel box girder. The results show that the spatial effect of the bridge is obvious, and the bearing has evident stress concentration. The bridge has the risk of failure in the standard combination and the bridge has the bearing invalidation risk under the standard combination. The first and the second order vibration mode of the bridge are mainly controlled by bending. The third to the fifth order vibration mode are controlled by the reverse.

## Keywords

Deformed Steel Box Girder, Force Characteristics, Plate Unit, Finite Element Method

---

# 异形钢箱梁桥空间内力分析

何知银<sup>1</sup>, 李德建<sup>2</sup>, 马 衡<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>贵州省都匀公路管理段, 贵州 都匀

<sup>2</sup>中南大学土木工程学院, 湖南 长沙

Email: \*maheng0731@163.com

收稿日期: 2017年3月11日; 录用日期: 2017年3月28日; 发布日期: 2017年3月31日

---

## 摘 要

为了顺应线路的走向, 各种异形桥梁不断出现, 异形钢箱梁因为其制作、安装、美观上的优势越来越受

\*通讯作者。

到青睐。现今对异形桥梁结构受力特性的简化分析方法, 仍然存在着很多不足, 所以对异形桥梁受力特性进行精确的分析非常必要。本文采用Midas/Civil中的板单元精确建立某异形钢箱梁的模型, 结果表明: 该桥的空间效应十分明显, 在支座处存在明显的应力集中现象; 该桥在标准组合下有支座存在失效的风险; 该桥前两阶振型主要由弯曲控制, 第三至第五阶振型由扭转控制。

## 关键词

异形钢箱梁, 受力特性, 板单元, 有限元

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

为了顺应线路的走向, 公路各种异形桥梁不断出现, 异形钢箱梁因为其制作、安装以及美观上的优势越来越受到青睐[1]。但是异形桥梁相对于一般的直线桥梁, 其受力方式复杂, 传统的平面杆系算法对于这类桥梁的计算已经越来越力不从心[2]。国内外就有不少由于缺乏对异形桥梁受力特性的了解, 而导致的各种桥梁病害[3]。因此, 精确分析异形桥梁的受力特性非常必要。

随着通用有限元程序的发展, 基于平面应力与弯曲复合的板壳元分析异形桥梁已是一种趋势, 如通用有限元软件 Ansys 和 Midas/Civil 等。这些软件为全面分析异形钢箱梁的受力特点提供了很好的平台。已有的异形桥梁的模拟主要采用剪力柔性梁格法, 但是此种方法不能对顶板、底板和腹板的受力进行精确的模拟[4] [5] [6] [7]。因此对于异形钢箱梁桥, 建立整体的板壳模型精确模拟受力情况就非常必要。本文基于某异形钢箱梁的实际工程, 采用 Midas/Civil 建立全桥的板壳单元模型, 以减少传统剪力柔性梁格法计算时因自由扭转假设、边界条件假设及横向尺寸效应假设等所引起的失真, 从而对其空间受力特性进行更为可靠的分析, 研究其在不同荷载作用之下的截面应力、结构位移、支座反力以及自振特性等情况, 为今后类似桥梁的设计计算提供参考。

## 2. 本案例桥梁的设计参数

### 2.1. 桥梁的整体设计

钢箱主梁采用正交异性桥面板全焊箱型断面钢箱梁, 材料采用 Q345C 钢材。

为了方便地说明桥梁的大体结构, 可以将桥梁分为两个大部分: 桥梁直线段与桥梁曲线段, 分别对应图 1 中桥梁中心线为直线和曲线的部分。异型桥梁由于其特殊的形状, 其支座布置一般比直线桥梁要复杂。对于本桥, 在 G1 处设置了一个三向约束, 在 B9、I9、I10、G1 处均布置了双向支座, 其余均设置为单向支座。具体支座布置以及支座型号如图 1 所示。

钢箱梁直线段顶板宽 9.0~8.379 m, 底板宽 6.6 m, 悬臂长 1.2 m, 钢箱梁高 1.7 m; 钢箱梁曲线段顶板宽 8.0 m, 底板宽 5.6 m, 悬臂长 1.2 m, 钢箱梁高 1.7 m。桥梁的横隔板、腹板和桥梁的整体布置图如图 2, 其中虚线表示桥梁的腹板以及横隔板, 红色实线表示桥梁的外轮廓线。钢箱梁顶板厚 16 mm, 底板厚 16mm, 腹板厚 16 mm; 车行道部分桥面板采用 U 型加劲肋, 标准横向间距直线段为 500 mm, 曲线段为 525mm, 悬臂板采用板肋, 间距为 250 mm; 底板采用 T 型加劲肋, 直线段间距为 400 mm; 曲线段为 440 mm。腹板采用板肋。横隔板的布置如图 1 中虚线所示, 横隔板厚度为 16 mm。

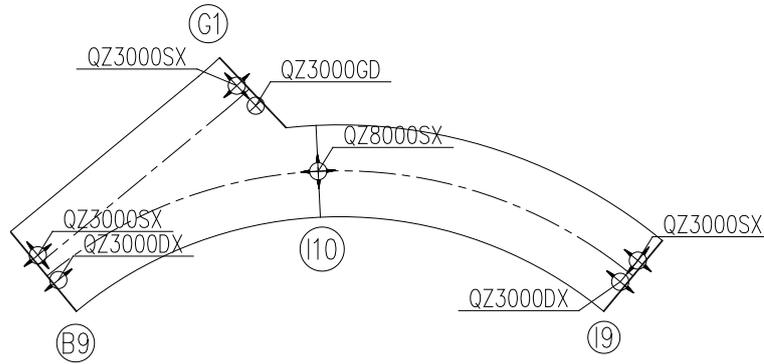


Figure 1. The support arrangement plan of deformed steel box girder  
图 1. 桥梁的支座布置图

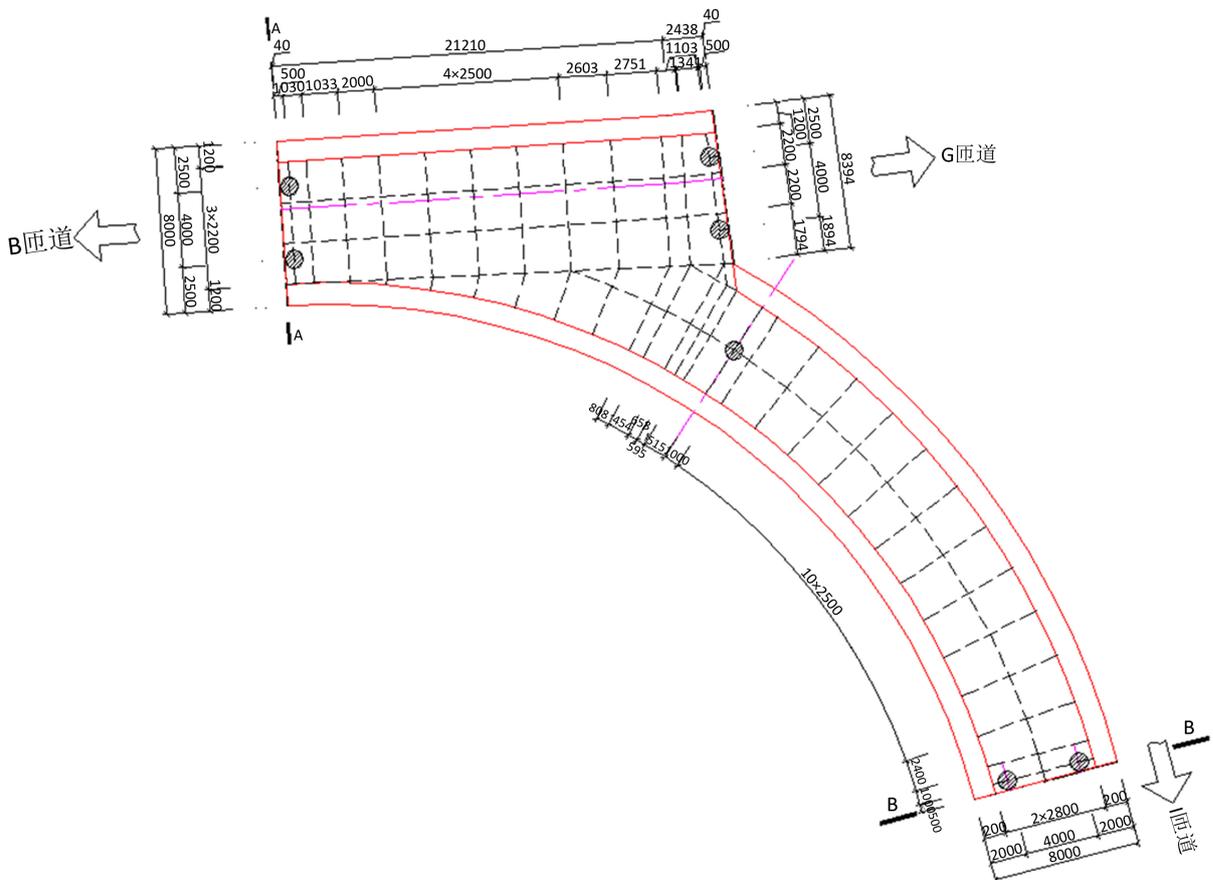


Figure 2. The arrangement plan of deformed steel box girder  
图 2. 桥梁的整体布置图

## 2.2. 结构有限元模型的建立

### 2.2.1. 建模说明

(1) 结构模拟：异形曲线钢箱梁受力情况复杂，运用一般的平面杆系分析方法进行计算，不能全面反映结构的受力特性和传力途径。本桥采用 Midas/Civil 有限元程序，建立板壳单元模型并进行计算，其中桥面铺装和附属设施不参与受力，以恒载的形式等效于有限元模型中。模型主要采用的板单元为 4 节点

薄板单元，同时为了更好地划分网格，在某些局部区域采用了 3 节点薄板单元过渡，具体布置的细节可以参照图 3。最终建立的桥梁整体有限元模型一共 22,595 个节点，25,096 个单元，有限元模型整体如图 4 所示。

(2) 荷载组合工况考虑：通过 Midas/Civil 自动组合功能实现荷载组合，依据《城市桥梁设计规范》(GJJ 11-2011)取升温 and 降温两种最不利组合进行验算。下文出现的恒载均指结构自重和二期恒载之和。

升温基本组合 1:  $S_{u1} = \text{恒载} + \text{支座沉降} + \text{汽车荷载} + \text{升温梯度}$

降温基本组合 2:  $S_{u2} = \text{恒载} + \text{支座沉降} + \text{汽车荷载} + \text{降温梯度}$

### 2.2.2. 计算参数

该桥主要计算参数如下：

(1) 结构自重以及二期恒载：Q345C 钢材容重  $78.5 \text{ kN/m}^3$ ，并考虑附加焊缝重量(以钢箱梁自重的 1.5% 计)；护栏  $15.0 \text{ kN/m}$ ，沥青混凝土容重  $24.0 \text{ kN/m}^3$ ，厚度取  $10 \text{ cm}$ ；C50 钢筋砼容重  $25.0 \text{ kN/m}^3$ 。取 Q345C 轴向容许应力为  $200 \text{ Mpa}$ ，弯曲容许应力为  $210 \text{ Mpa}$ ，剪切容许应力为  $120 \text{ Mpa}$ 。

(2) 汽车荷载：城-A 级，考虑该处车流量较大，故不考虑横向折减效应。本桥主道和匝道都以两车道计算。

(3) 支座沉降：考虑纵横向的不均匀沉降，按单个支座处沉降  $5 \text{ mm}$  考虑。

(4) 局部温差：按升温  $14^\circ\text{C}$ 、降温  $7^\circ\text{C}$  计。

## 3. 计算结果及其分析

### 3.1. 应力分析

运用板单元模型能够计算出全桥任意处的应力分布情况，这对于研究此类薄壁结构具有很大的优势。von-Mises 屈服准则表示在一定的变形条件下，当受力物体内一点的等效应力达到某一个定值时，该点即可判定为进入塑性状态，该准则能够较为准确反映截面的受力与失效情况[8]。图 5(a)~图 5(d)是升温组合的作用下，钢箱梁的腹板、顶板、底板和横隔板的 von-Mises 应力云图；图 6(a)~图 6(d)是降温组合的作

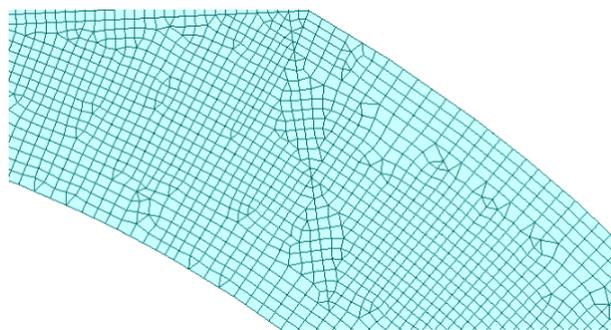


Figure 3. The finite element model of I10 support  
图 3. I10 支座附近单元的布置图

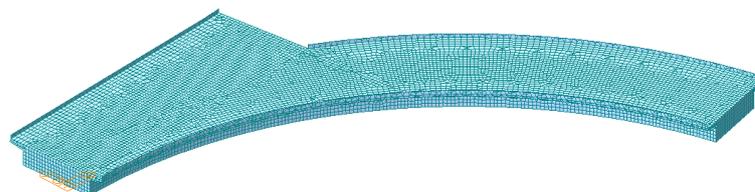
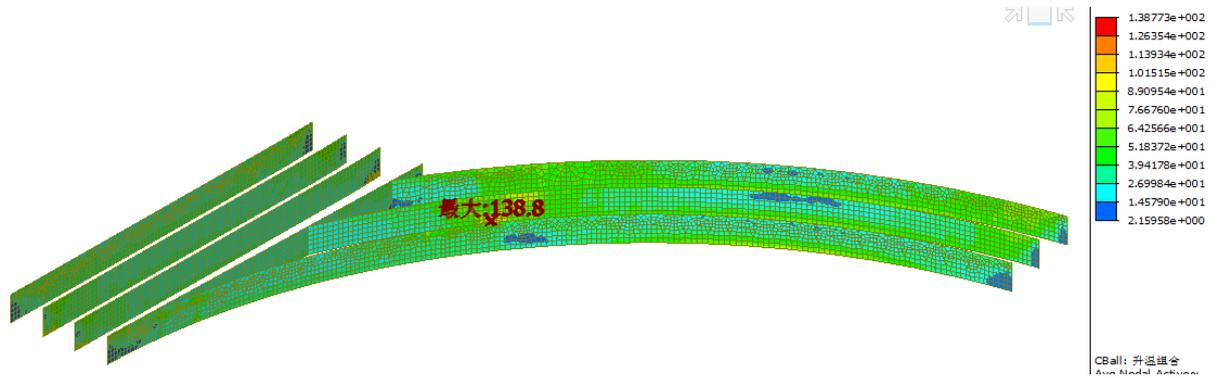
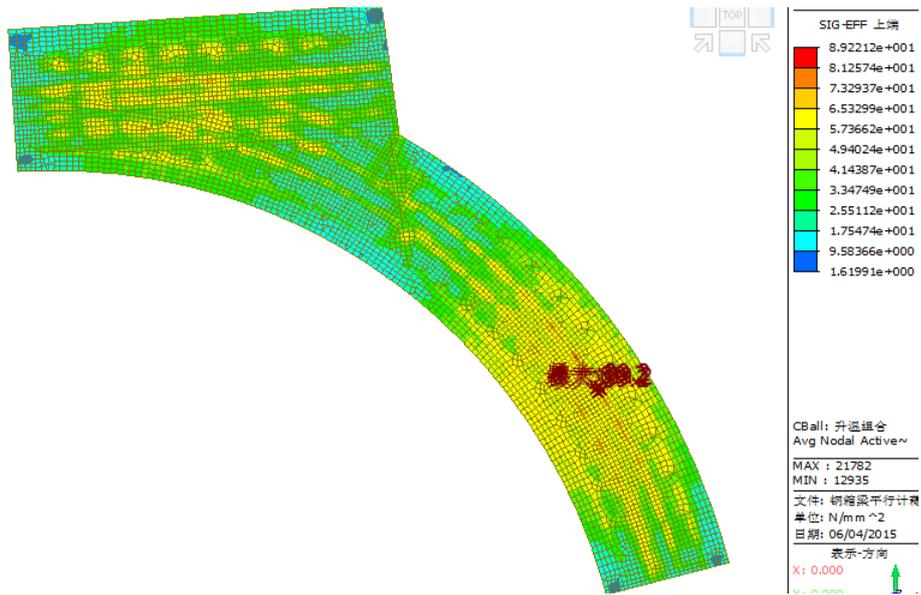


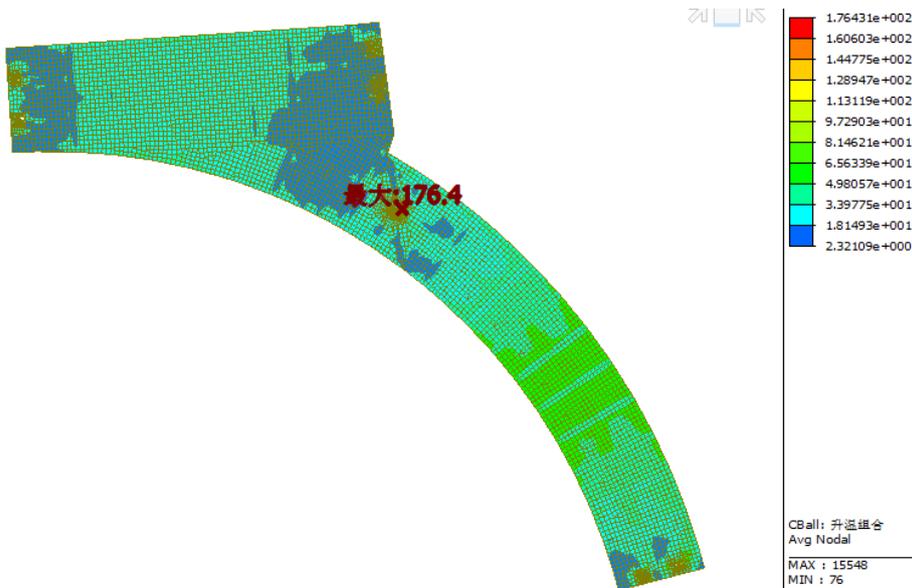
Figure 4. The finite element model of deformed steel box girder  
图 4. 桥梁整体有限元模型



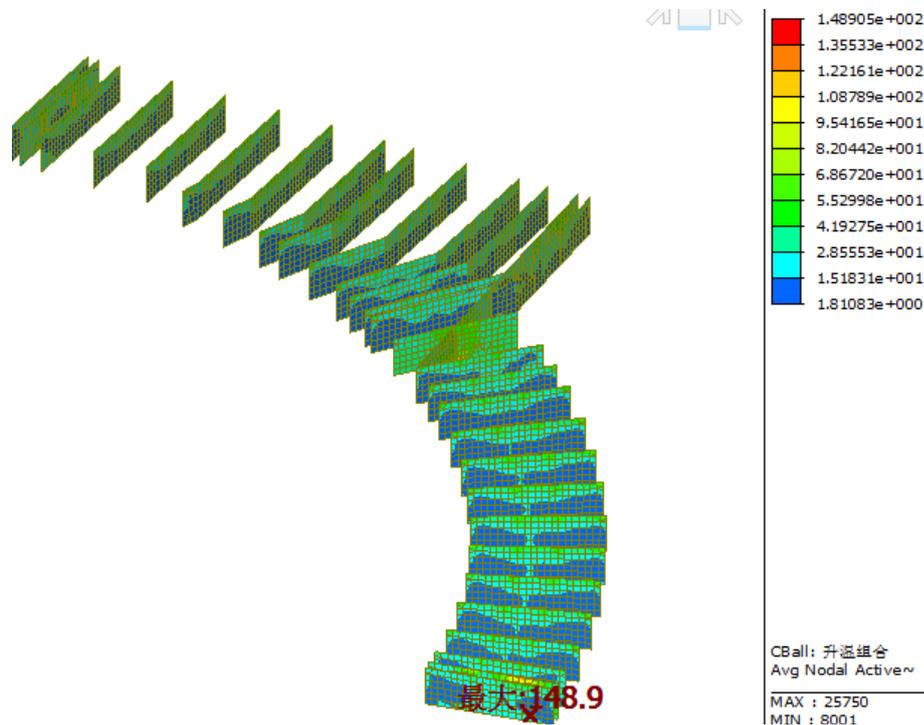
(a) 升温组合下腹板的 von-Mises 应力云图



(b) 升温组合下顶板的 von-Mises 应力云图



(c) 升温组合下底板的 von-Mises 的应力云图



(d) 升温组合下横隔板的 von-Mises 的应力云图

**Figure 5.** Von-Mises stress map of deformed steel box girder under heating combination  
**图 5.** 升温组合作用下桥梁各结构的 von-Mises 应力图

用下，钢箱梁的腹板、顶板、底板、横隔板的 von-Mises 应力云图。

在升温组合下，根据图 5，从整体来说，桥梁整体的 von-Mises 应力处于一个较低的水平。同时从图 5 也可以得出，在升温组合的作用下，桥梁的最大 von-Mises 应力主要出现在支座的附近，最大只有 176.4 Mpa，小于 Q345C 的容许应力，满足规范要求。

从图 6 可以看出，在降温组合下，桥梁的应力分布情况与升温的情况类似。桥梁平均应力不大，但是在支座处出现较大的应力集中，且出现的范围仅限于支座附近。所以我们可以得出结论，对于本桥需要在支座处进行加强设计。实际上，本桥本桥支座处钢板厚度已加厚至 40 mm，并设置了支座加劲肋。

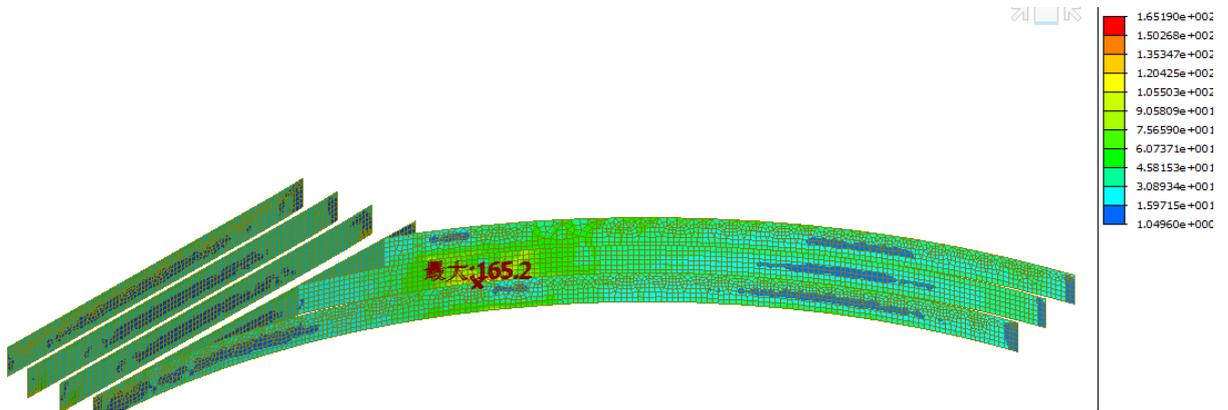
### 3.2. 挠度分析

在不计冲击系数的汽车荷载作用下，桥梁的竖向挠度见图 7。

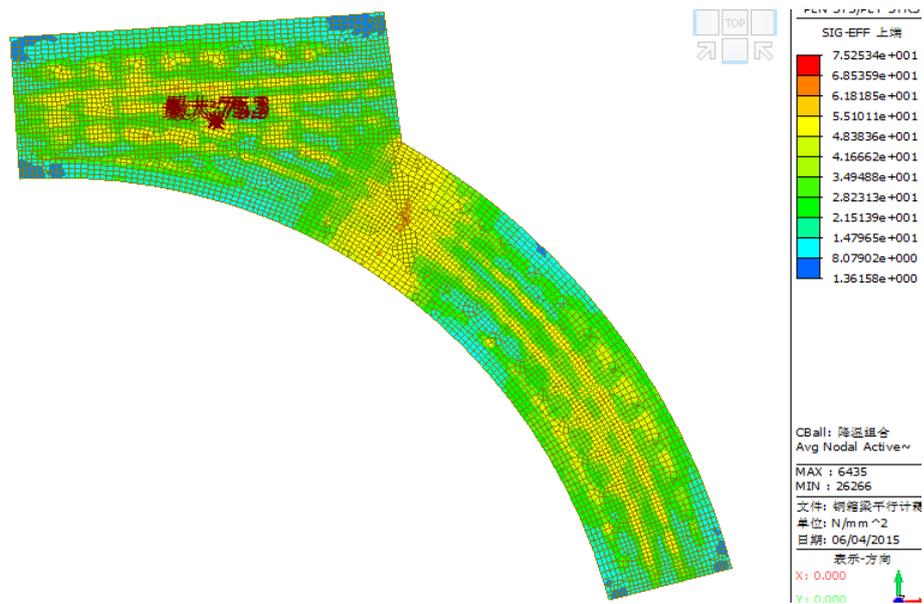
由图 7 可得，在仅有活载的情况下，桥梁的最大挠度为 13.78 mm，出现于曲线段 I9~I10 跨的跨中外侧。根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64-2015)，汽车荷载(不计冲击力)所引起的竖向挠度不应超过跨度的  $L/600$ ，本桥 I9-I10 跨的跨度为 29.545 m，规范限值为  $29.545/600 = 0.0492 \text{ m} = 49.2 \text{ mm}$ ，满足规范要求。

在结构重力和静活载作用下，结构的竖向挠度见图 8。

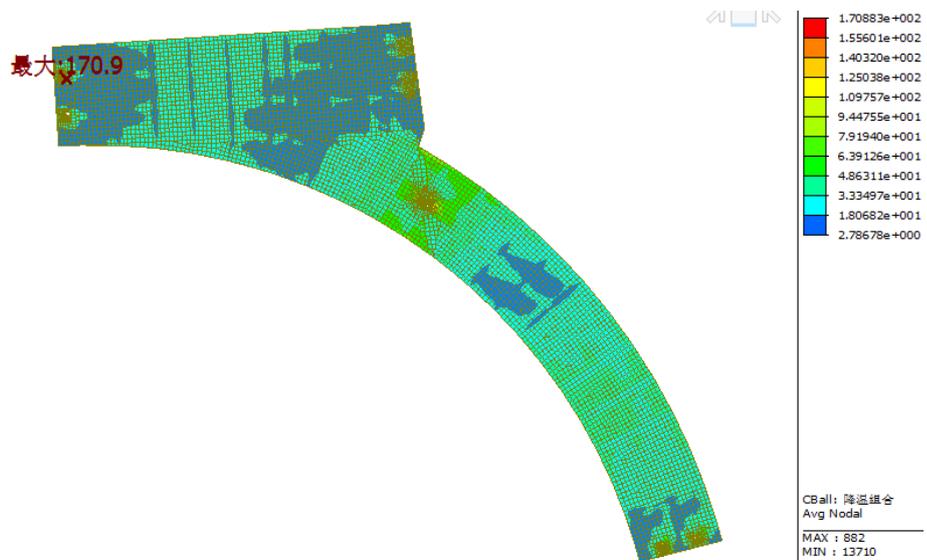
由图 8 可得，在结构重力和静活载作用的情况下，桥梁的最大挠度出现在 I9-I10 跨跨中，最大挠度为 29.18 mm，根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64-2015)，结构重力和静活载所引起的竖向挠度超过跨度的  $L/1600$  时，应设置预拱度。本桥 I9-I10 跨的跨度为 29.545 m，规范限值为  $29.545/1600 = 0.0185 \text{ m} = 18.5 \text{ mm}$ ，故应该按照规范设置预拱度。



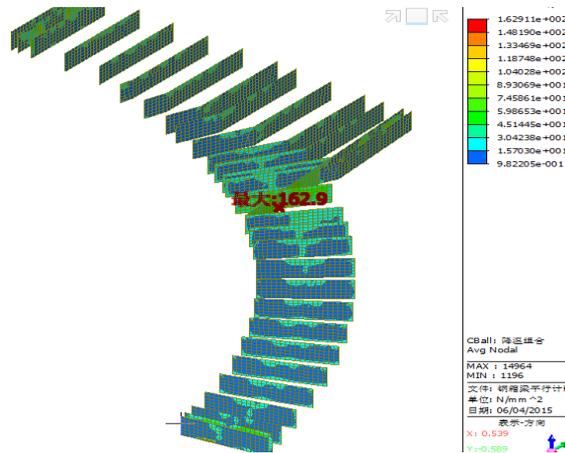
(a) 降温组合下腹板的 von-Mises 应力云图



(b) 降温组合下顶板 von-Mises 的应力云图



(c) 降温组合下底板 von-Mises 应力云图



(d) 降温组合下横隔板的 von-Mises 应力云图

Figure 6. Von-Mises stress map of deformed steel box girder under cooling combination  
图 6. 降温组合作用下桥梁各结构的 Von-Mises 应力图

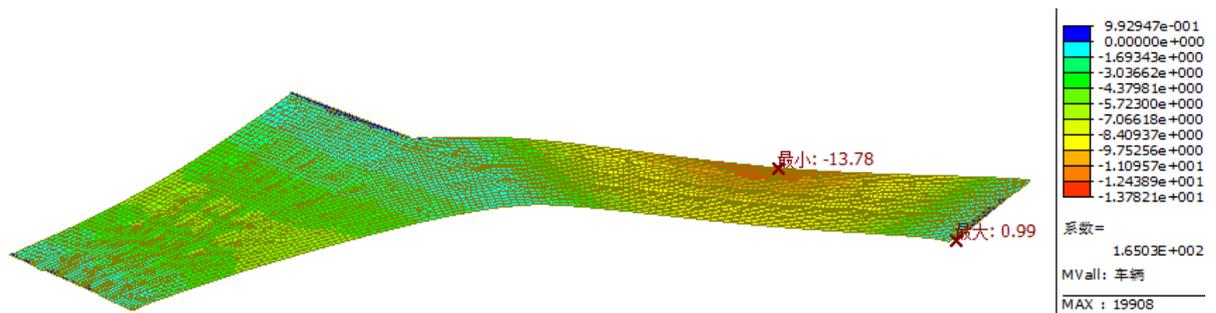


Figure 7. Deflection map of deformed steel box girder under live load  
图 7. 活载作用下桥梁的竖向挠度

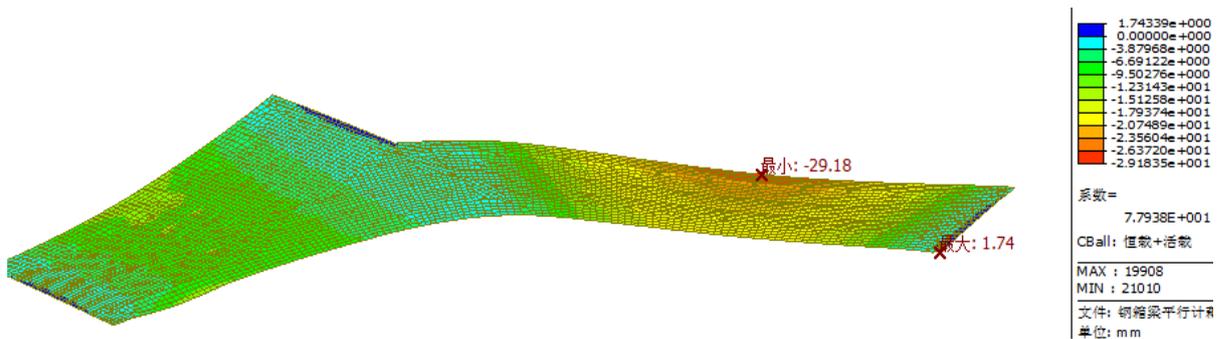


Figure 8. Deflection map of deformed steel box girder under structure of gravity and live load  
图 8. 结构重力和静活载作用下桥梁的竖向挠度

### 3.3. 支座反力分析

由于本桥空间具有明显的空间效应，支座反力的分布非常不均匀。为了验算支座反力，在恒载和活载的作用下，选取标准组合进行计算，计算的结果如表 1 所示。表 1 说明了全桥最大支反力出现在 I10 墩 QZ8000SX 支座，其数值已经远远超过了其他支座的支反力，为 4778.26 kN，满足支座的承载力 8000 kN 的要求；同时我们也发现 I9 号墩型号为 QZ3000DX 支座可能会出现 -268.81 kN 的支反力，此种情况下，支座已经脱空，对桥梁的受力非常不利。经过分析，I10 墩支座出现比较大的支反力的主要原因是：

I10 墩同时承受了该异形钢箱梁桥直线段和曲线段荷载, 受力相对集中且复杂; 而 I9 号墩 QZ3000DX 支座出现负反力则可以用斜交桥梁的受力特性考虑, 斜交桥梁的钝角边在荷载作用下可能会出现翘起, 即出现负反力, 本桥实例 QZ3000DX 支座位于桥梁的钝角边界附近, 出现负反力的可能性大大增加[9]。

### 3.4. 自振特性分析

本文结构模态分析采用 Lanczos 法, 计算得其前五阶自振特性结果如表 2, 对应的振型图如图 9。由表可知, Midas/Civil 板单元模型计算得本桥的基频为 4.210 Hz, 该桥一阶振型为直道 B9~G1 跨的竖向弯曲。由振型图可知, 弯曲效应对该桥前两阶振型具有较大的影响, 扭转对第三阶至第五阶振型影响较大, 在设计中应引起重视。

## 4. 结论

本文基于某异形钢箱梁的实际工程, 以 Midas/Civil 中 4 节点薄板单元为主体, 辅之以少量的 3 节点薄板单元, 对全桥空间精细化仿真建模, 研究了其在不同工况下的截面应力、结构位移、支座反力以及自振特性的情况, 经过分析, 可以得出如下结论:

**Table 1.** End reaction table of deformed steel box girder under standard combination

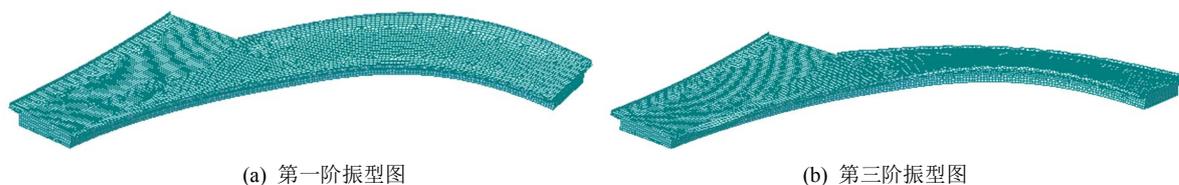
**表 1.** 标准工况组合下的支座反力

| 桥墩号 | 支座型号     | 最大支反力(kN) | 最小支反力(kN) |
|-----|----------|-----------|-----------|
| B9  | QZ3000SX | 1363.09   | 536.76    |
|     | QZ3000DX | 1392.61   | 214.20    |
| G1  | QZ3000SX | 1212.16   | 494.70    |
|     | QZ3000GD | 901.19    | 149.50    |
| I10 | QZ3000SX | 4778.26   | 2946.97   |
| I9  | QZ3000SX | 1960.44   | 774.41    |
|     | QZ3000DX | 896.17    | -268.81   |

**Table 2.** The results of natural vibration modes

**表 2.** 自振特性的计算结果

| 阶数 | 频率 f  | 主要的振动特性         |
|----|-------|-----------------|
| 1  | 4.210 | 直道 B9~G1 跨的竖向弯曲 |
| 2  | 6.623 | 直道 B9~G1 跨的竖向弯曲 |
| 3  | 8.014 | 匝道 I9~I10 跨的扭转  |
| 4  | 9.224 | 匝道 I9~I10 跨的扭转  |
| 5  | 10.15 | 匝道 I9~I10 跨的扭转  |



**Figure 9.** Natural vibration modes of deformed steel box girder

**图 9.** 异形钢箱梁结构的自振振型

(1) 该类型异形桥梁在城市立交桥中因为其结构非常灵活,但是采用一般的基于简单梁单元的计算方法往往不能完全模拟出桥梁的受力特征,若采用贴近结构实际的板壳单元进行精细化的建模,通过空间影响面进行精确的加载,有利于减小结构空间效应的影响,防止局部应力过大导致结构强度不足以及支座脱空的不利情况的出现。

(2) 该桥的空间效应十分明显,从升降温组合荷载作用下的应力分布可以看出,桥梁在荷载作用下整体的 von-Mises 应力水平不高,只有支座附近处是应力比较集中的部位,为了保证桥梁有着足够的安全系数,有必要对异形桥梁的支座附近进行一定的加强处理。

(3) 该桥支座反力不均匀的现象非常突出,支座反力值受结构的影响特别明显。在标准组合作用下,最大支反力出现在 I10 号墩的 QZ8000SX 支座;最小支反力出现在 I9 号墩的 QZ3000DX 支座,最小支反力为-268.81 kN,这表明该支座在此种情况下已经出现了脱空的情况。因此在设计中应该注意支座承载力和种类的选取,以抑制负反力的出现并取得良好的经济效果。

## 基金项目

国家自然科学基金资助项目(51378504)。

## 参考文献 (References)

- [1] 蔡枫. 上海闸北区体育中心大体积异型钢箱梁加工技术[J]. 城市住宅, 2016(11): 117-119.
- [2] 刘斌. 城市立交桥中异形箱梁的有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [3] 刘超凤. 城市高架桥异型曲线钢箱梁空间受力性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [4] 卢彭真, 张俊平, 赵人达, 等. 箱梁单元与梁格法在异型桥梁分析中的应用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(2): 54-57.
- [5] 李立峰, 邵旭东. 扁平钢箱梁闭口 U 形加劲板屈曲特性理论分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(3): 88-92.
- [6] 董杰. 曲线连续钢箱梁单元与板单元模型计算分析[J]. 城市道桥与防洪, 2014(1): 59-60.
- [7] 戴公连, 李德建. 桥梁结构空间分析设计方法与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [8] 杨锋平, 孙秦. 屈服准则及切线模量修正的弹塑性计算模型[J]. 力学学报, 2010, 42(4): 804-810.
- [9] 王世界, 郑力, 高应振. 斜交桥梁平转扭曲效应分析[J]. 钢结构, 2013, 28(8): 24-27.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)