

小半径九十度弯曲钢箱梁桥空间受力特性研究

钱 竹^{1,2}, 于 鹏^{3*}, 傅庆湘⁴, 王宏贵⁵

¹长沙市规划设计院有限责任公司, 湖南 长沙

²中铁建工集团有限公司, 北京

³中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙

⁴湖南轨道技术应用研究中心有限公司, 湖南 长沙

⁵中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年1月12日; 录用日期: 2026年2月4日; 发布日期: 2026年2月14日

摘要

城市立交匝道因红线、既有构筑物或景观限制, 有时需采用极小平曲线半径的钢箱梁桥, 该类桥梁的弯-扭耦合效应、剪力滞、畸变翘曲与支座横桥向不均匀受压并存, 使得挠度、应力及反力分布与直线梁差异显著。本文以某小半径九十度弯曲钢箱梁为例, 采用板壳单元进行了全桥空间精细化仿真, 主要结论如下: 1) 该桥空间效应显著, 恒载下的中跨跨中截面外侧挠度达到内侧的1.48倍, 预拱度设计时应予以注意; 静活载作用下, 上述差异进一步放大; 2) 应重视对支座处钢箱构件的局部强化设计, 从而降低底板厚度需求而节约钢材用量; 3) 同一桥墩处的支反力不均现象明显, 支座选型时应有所差异; 4) 在立交设计中, 必要时可采用90°弯曲钢箱梁, 曲线半径可小至40 m, 但需依据全桥精细化模型和空间影响面结果进行设计, 尤其应避免出现支座脱空甚至上构倾覆风险。

关键词

立交桥, 曲率半径, 空间效应, 预拱度, 应力集中, 支座反力

Study on Spatial Mechanical Behavior of Steel Box Girder Bridges with Small-Radius and 90-Degree Curvature

Zhu Qian^{1,2}, Peng Yu^{3*}, Qinxiang Fu⁴, Honggui Wang⁵

¹Changsha Planning & Design Institute Co., Ltd., Changsha Hunan

²China Railway Construction Engineering Group, Beijing

*通讯作者。

³China Construction Fifth Engineering Division Corp., Ltd., Changsha Hunan

⁴Hunan Rail Transit Technology Application Research Center Co., Ltd., Changsha Hunan

⁵Powerchina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha Hunan

Received: January 12, 2026; accepted: February 4, 2026; published: February 14, 2026

Abstract

Due to constraints such as right-of-way limits, existing structures, or landscape requirements in urban interchange ramps, steel box girder bridges with extremely small horizontal curve radii are sometimes adopted. In such bridges, combined bending-torsion coupling effects, shear lag, distortional warping, and transverse uneven compression at supports coexist, leading to significant differences in deflection, stress, and reaction distributions compared to straight girders. Taking a small-radius 90-degree curved steel box girder bridge as an example, a refined spatial simulation of the full bridge was conducted using shell elements. The main conclusions are as follows: 1) The spatial effects of the bridge were notable. Under dead load, the deflection at the outer side of the mid-span section reached 1.48 times that at the inner side, which should be considered in camber design. Under static live load, this difference was further amplified. 2) Local strengthening of steel box components at supports should be emphasized to reduce the required bottom plate thickness and save material. 3) Significant uneven distribution of support reactions was observed at the same pier, indicating that different bearing types should be selected. 4) In interchange design, 90-degree curved steel box girders with radii as small as 40 m may be used when necessary. However, design should be based on refined full-bridge models and spatial influence surface results, with particular attention to avoiding bearing uplift or even superstructure overturning risks.

Keywords

Interchange Bridge, Curvature Radius, Spatial Effect, Camber, Stress Concentration, Support Reaction

Copyright © 2026 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. 引言

城市立交匝道因红线、既有构筑物或景观限制[1]，有时需采用极小平曲线半径[2]。当桥梁中心线半径压缩至40 m级、转角近90°时，传统装配式混凝土梁因预制模板复杂[3]、湿接缝需变宽、现场吊重受限[4]而难以实施，钢箱梁[5]凭借轻质、工厂化焊接及三维曲线易成型[6]等优势成为首选。然而，曲线钢箱梁桥存在弯-扭耦合效应[7]，剪力滞[8]、畸变翘曲[9]与支座横桥向不均匀受压[10]并存，使得挠度、应力及反力分布与直线梁差异显著[11]；若仍按常规直线梁经验设定预拱度或统一支座型号，易导致铺装层早期开裂、支座脱空甚至倾覆隐患。国内外对曲线钢箱梁的研究多集中于半径不小于100 m的连续梁[12]或组合梁[13]，对半径40 m、转角达90°的极端案例尚缺乏系统研究。为此，本文依托某城市立交小半径九十度弯曲钢箱梁匝道桥，建立全桥精细化板壳单元模型，系统分析其在各类荷载作用下的空间变形、应力、反力与抗倾覆稳定性，揭示小半径极端曲线梁的受力机理，提出可供同类工程参考的预拱度设置原则、局部加强范围及支座差异化选型建议。

2. 设计概况及计算模型

2.1. 设计概况

如图 1, 本桥位于某城市立交桥匝道上, 匝道中心线与钢箱梁中腹板重合, 该处曲线半径小至 4000 cm, 1#墩与 4#墩的横向中心线夹角为 90°, 采用三箱三跨连续钢箱梁结构, 跨径布置为(2400 + 3217 + 2400) cm, 桥宽 900 cm, 梁高 180 cm。采用 Q345D 钢材, 顶底板均厚 2 cm, 腹板均厚 1.6 cm, 横隔板与腹板均为正交布置, 支座横隔板厚 2.5 cm, 普通横隔板厚 1.4 cm。考虑到这类小半径曲线梁桥的弯扭耦合效应显著, 横隔板采用密集布置、最大间距不超过 200 cm。底板上方设置 T 肋, 顶板悬臂板下方和腹板设置一字形板肋, 其余均为 U 肋。该桥桥面铺装自上而下为“5 cm 改性沥青 SMA13 + 5 cm 浇筑式沥青混凝土 GA10 (撒布 5~10 mm 预拌碎石) + 甲基丙烯酸树脂防水层”。桥梁设计荷载为城-A, 汽车活载为单向双车道, 支座沉降按 0.5cm 考虑, 整体升降温按 25 度计算, 梯度温度按规范计算。

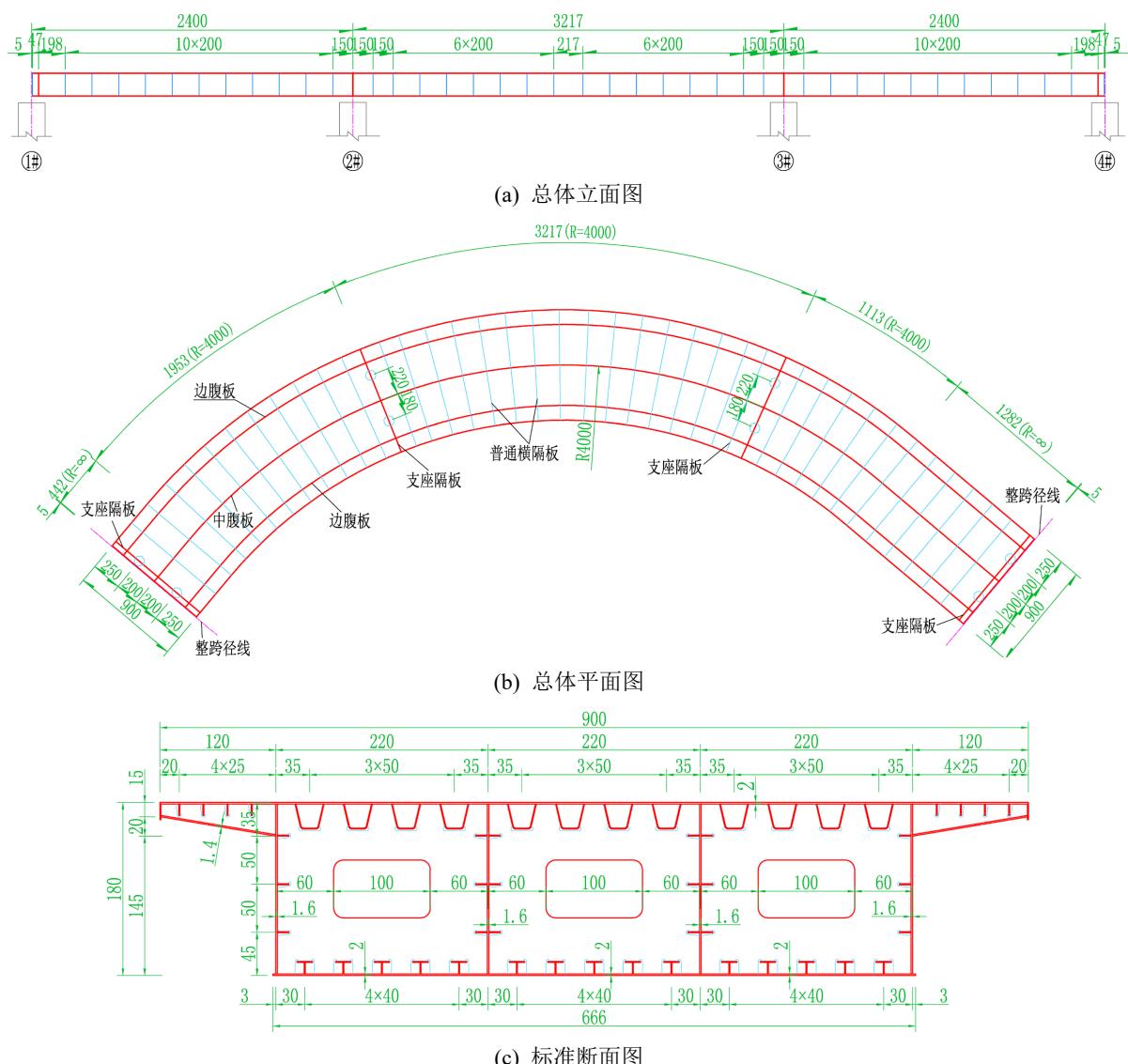


Figure 1. Overall layout drawing of the steel box girder (unit: cm)

图 1. 钢箱梁总体布置图(单位: cm)

2.2. 计算模型

曲线梁桥在各类荷载(尤其是偏载)作用下,会同时出现弯曲、扭转、畸变和剪力滞耦合效应,这种效应在小半径九十度弯曲钢箱梁桥中更为显著,为精确分析其空间受力[14],建立精细化有限元模型如图2,建模要点如下: (1) 几何模型: 钢箱梁的平曲线及各顶、底、腹板、加劲肋和横隔板均与图1一致; (2) 单元划分: 不考虑铺装层刚度,钢箱梁顶、底、腹板、加劲肋和横隔板均采用板壳单元离散,以四边形单元为主,辅以三角形单元过渡,以精确反映全桥空间受力特性,模型共39,354个节点,46,090个单元; (3) 边界条件: 各支座节点均设置节点局部坐标系(其X轴方向为平曲线径向、Y轴方向为平曲线切向、Z轴为竖向),3#墩内侧为固定支座,其余内侧支座均约束X轴方向自由度、并释放Y轴方向自由度,3#墩外侧支座约束Y轴方向自由度,其余外侧支座均同时释放X轴和Y轴方向自由度,具体布置如图2(c); (4) 加载方式: 铺装、护栏分别按均布面荷载加载,城-A车道荷载按空间影响面[15]加载,纵横向均可考虑最不利位置进行布载,并按规范包络所有工况的最不利结果进行验算。

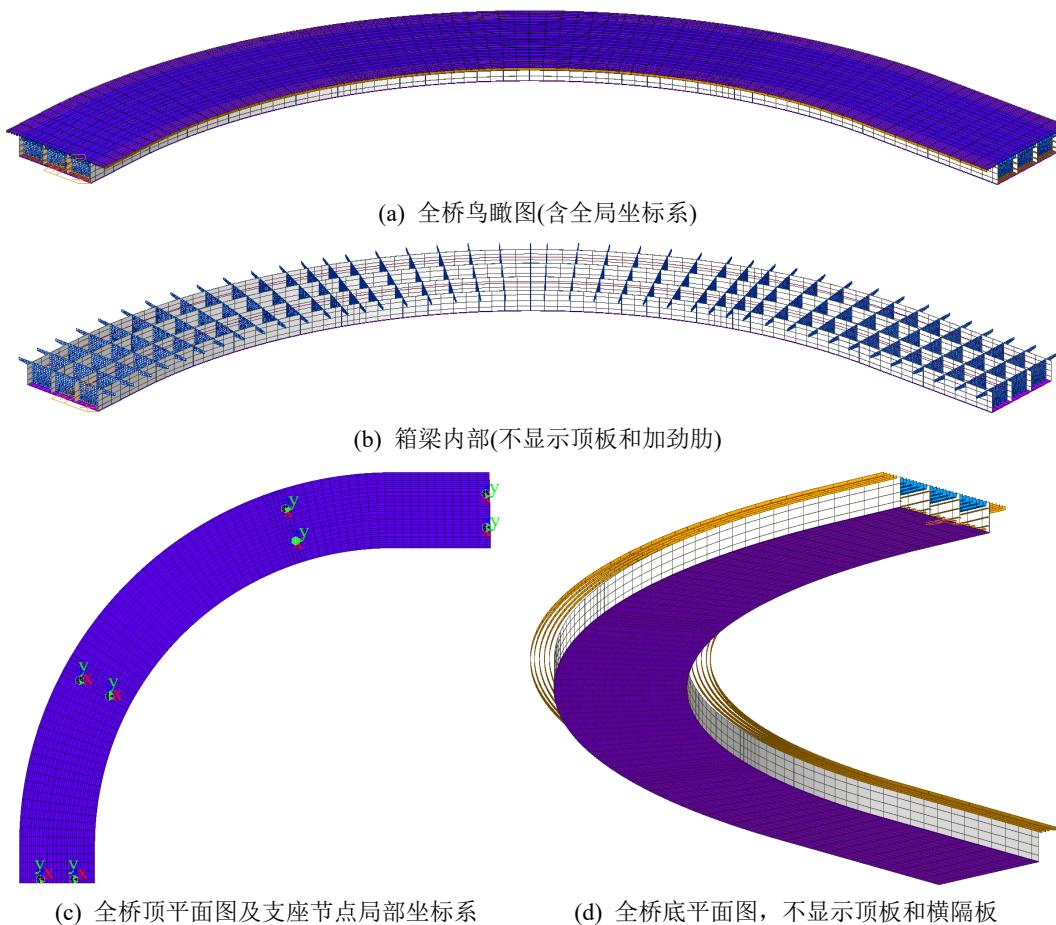


Figure 2. Refined finite element model of the steel box girder

图 2. 钢箱梁精细化有限元模型

3. 计算结果及分析

3.1. 结构变形

不同工况下的全桥竖向变形结果如下图3,分析可知: (1) 如图3(a),恒载作用下,钢箱梁顶板最大

挠度为 -11.4 mm , 出现在中跨跨中截面的外侧边缘, 而中跨跨中截面的内侧边缘挠度仅为 -7.7 mm , 两侧位移差达到 3.7 mm , 外侧挠度是内侧挠度的 1.48 倍, 进行预拱度设计时应予以注意; 可见, 即使是恒载作用下, 小半径九十度弯曲钢箱梁桥仍具有显著的空间效应。(2) 如图3(b), 最不利车道静活载作用下, 顶板最大挠度为 $-13.7\text{ mm} < L/600 = 53.6\text{ mm}$ (L 为中跨跨径), 虽然满足规范要求, 但跨中截面的两侧位移差达到 5.7 mm , 外侧挠度是内侧挠度的 1.71 倍, 其空间变形差异相比恒载作用下进一步放大。

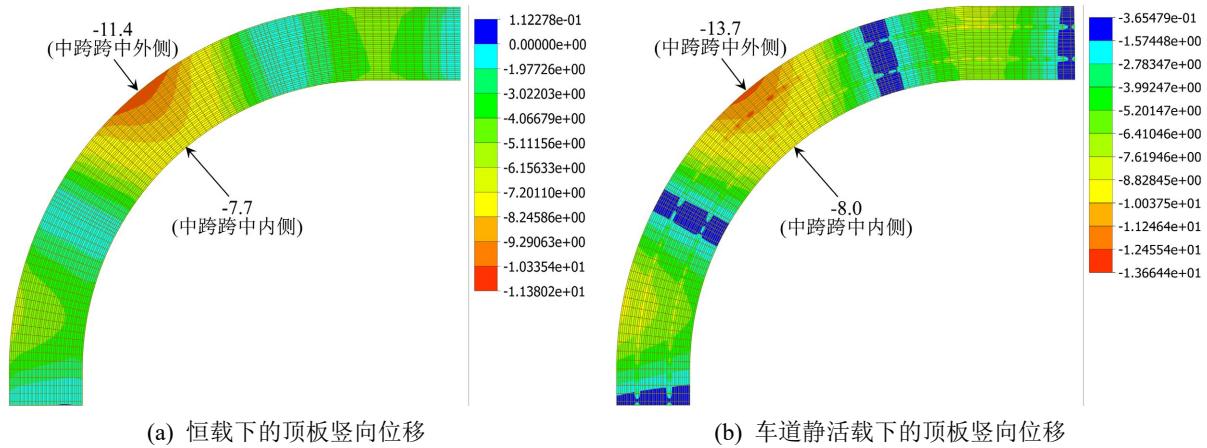


Figure 3. Deformation result of the entire bridge of the steel box girder (unit: mm)

图3. 钢箱梁全桥变形结果(单位: mm)

3.2. 强度应力

不同工况下的全桥 Mises 应力结果如下图4, 分析可知: (1) 如图4(a), 恒载作用下, 钢箱梁顶板最大 Mises 应力为 31.4 MPa , 出现在2#墩处; 而中跨跨中处的应力则较低, 最大为 11.7 MPa ; 可见仅是静力恒载作用下, 顶板的应力水平整体不高。(2) 如图4(b), 恒载作用下, 钢箱梁底板最大 Mises 应力为 90.6 MPa , 出现在3#墩处, 主要为支座处应力集中所致; 而中跨跨中处的应力则较低, 最大为 15.8 MPa ; 可见仅是静力恒载作用下, 底板的应力水平总体上也不高, 但整体上高于顶板, 静力强度验算时应重点关注底板的应力水平。(3) 如图4(c), 承载力极限状态的所有工况最不利基本组合下, 钢箱梁底板最大 Mises 应力为 235.0 MPa , 出现在3#墩处, 主要为支座处应力集中所致; 而中跨跨中处的应力则较低, 最大为 59.7 MPa 。(4) 如图4(d), 承载力极限状态的所有工况最不利基本组合下, 钢箱梁中跨底板加劲肋的最大 Mises 应力为 116.8 MPa , 出现在3#墩处, 与附近底板的最大应力(235.0 MPa)差异较大, 主要是应力集中和该处的支座加劲肋受力分担所致; 而中跨跨中处的应力则较低, 最大为 53.3 MPa , 与附近底板的最大应力(59.7 MPa)差异较小, 互相验证了可靠性。

3.3. 支反力及抗倾覆

不同工况下的全桥支座反力结果如下图5, 分析可知: (1) 如图5(a), 各工况作用的基本组合(分项系数同承载力极限状态的基本组合)下, 单向受压支座始终保持受压状态, 对应现行《公路钢结构桥梁设计规范(JTG D64-2015)》条文说明4.2.2的特征状态I下的抗倾覆验算满足要求。(2) 如图5(b), 各工况作用的标准组合(分项系数均为1.0)下, 最不利的稳定效应/失稳效应 $= 3.15 > 2.5$, 故对应现行规范的特征状态II下的抗倾覆稳定性验算满足要求。综上可见, 对于该小半径九十度弯曲钢箱梁桥, 其支座布置设计是合理的。(3) 该桥支座反力不均匀现象明显, 图5(b)中3#墩处的两支座反力分别为 2587.4 kN 和 2117.1 kN , 前者比后者大 22.2% , 在支座选型时应进行差异化设计。

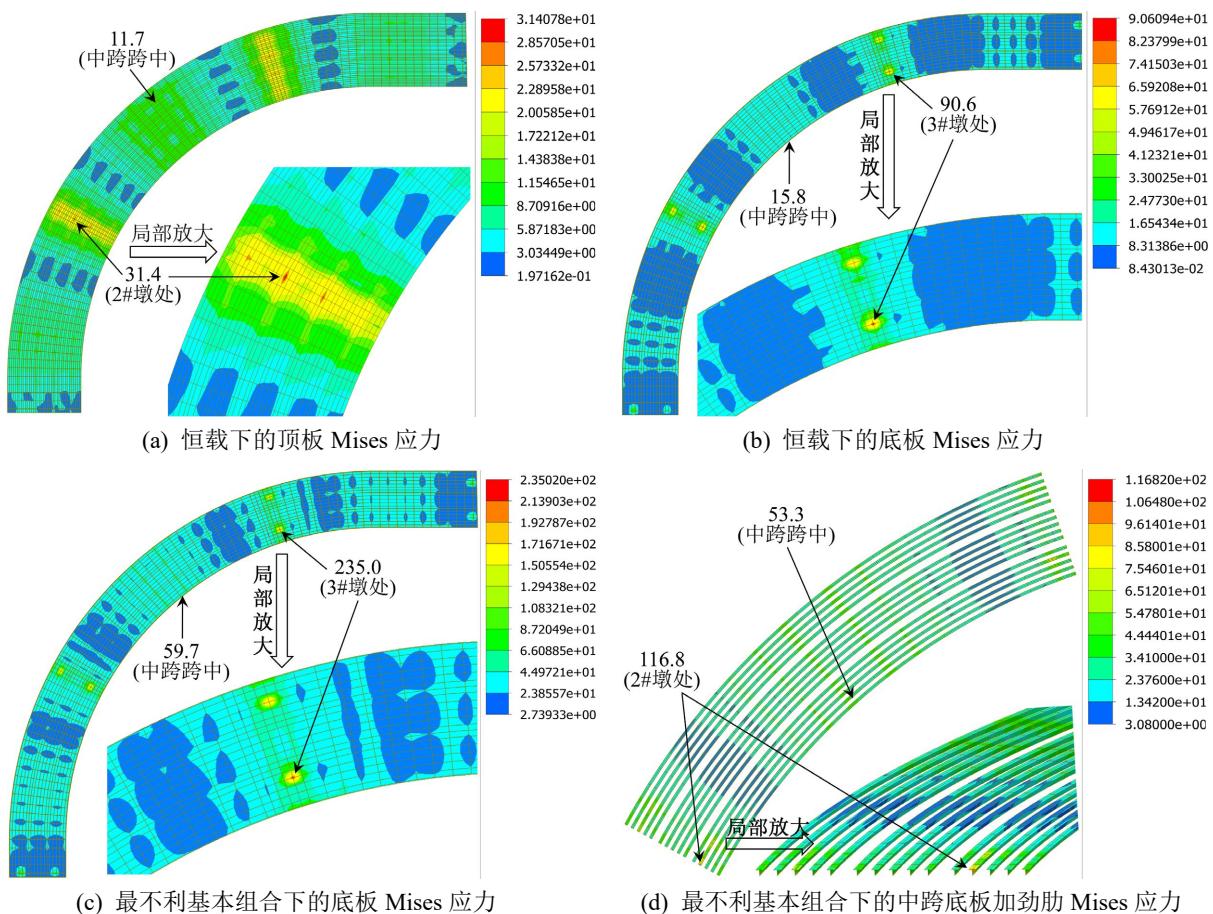


Figure 4. Mises stress result of the steel box girder (unit: MPa)

图 4. 钢箱梁 Mises 应力结果(单位: MPa)

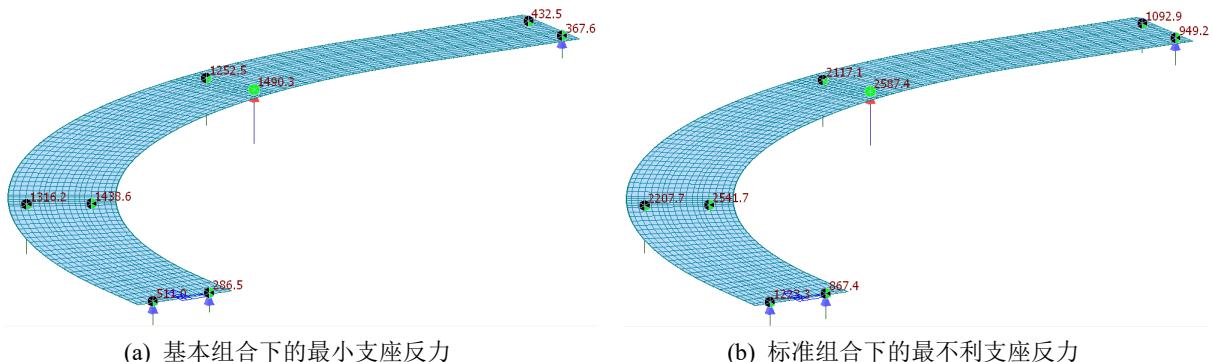


Figure 5. Support reaction result of the steel box girder (unit: kN)

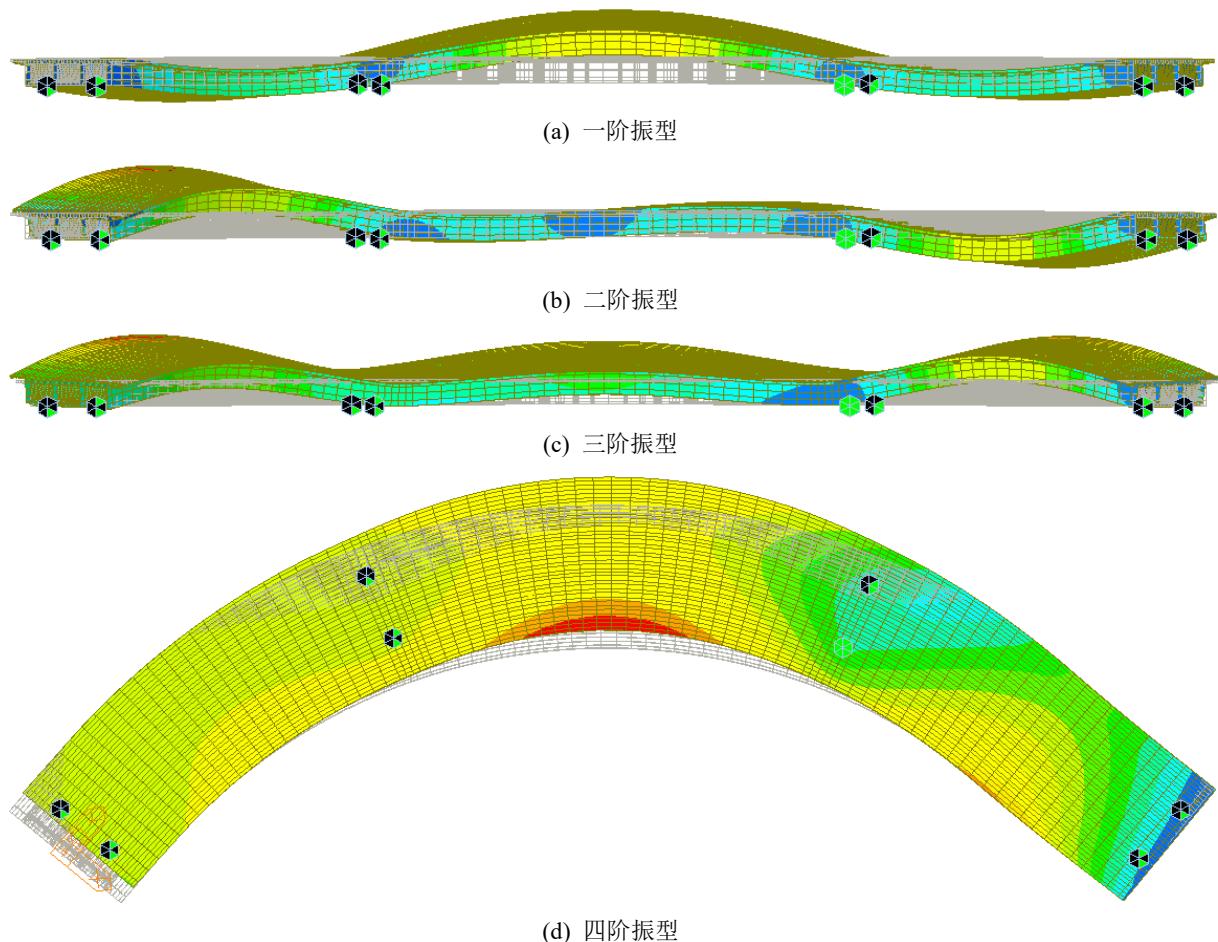
图 5. 钢箱梁支座反力结果(单位: kN)

3.4. 自振特性

全桥前 4 阶的振动特性结果如下表 1 和图 6, 分析可知: (1) 全桥前 4 阶振型的振型参与质量均包含 RX 的成分, 第 1、2 阶均为扭转主导, 第 3、4 阶振型则主要为多个方向的弯曲相互耦合, 并最终呈现为不均匀的空间扭转变形效应; (2) 小半径九十度弯曲钢箱梁的静力变形和自振特性均出现了显著的弯扭耦合效应, 在进行静力设计和减振控制时应注意其与直线梁桥的区别。

Table 1. Natural vibration characteristics**表 1. 自振特性**

模态号	频率	主要振动特征	振型参与质量(%)					
			DX	DY	DZ	RX	RY	RZ
1	4.37	一阶扭转和一阶竖弯耦合	0.8	0.6	3.4	4.6	1.8	0.5
2	6.82	二阶扭转	1.2	2.1	0.7	55.9	58.6	0.2
3	7.51	二阶竖弯和一阶横弯耦合	0.0	10.8	61.1	0.1	0.1	2.2
4	8.07	二阶横弯与三阶竖弯耦合	0.3	47.4	14.2	0.5	3.6	5.9

**Figure 6.** Natural vibration mode**图 6. 自振振型**

4. 结论

本文以某小半径九十度弯曲钢箱梁桥为工程案例, 采用板壳单元进行了全桥空间精细化仿真, 分析了其在不同工况下的变形、应力和反力, 可得出以下结论:

(1) 该桥空间效应显著, 即使在恒载作用下, 中跨跨中截面的外侧挠度达到了内侧挠度的 1.48 倍, 进行预拱度设计时应予以注意; 最不利车道静活载作用下, 其空间变形差异相比恒载作用下进一步放大,

外侧挠度达到了内侧挠度的 1.71 倍。

(2) 在各工况的最不利基本组合下, 底板最大 Mises 应力达到 235.0 MPa, 出现在 3#墩支座处, 主要为该处应力集中所致, 在设计中重视对支座处钢箱构件的局部强化设计, 可通过强化支座加劲肋和支座横隔板等局部构造来减轻应力集中的影响, 从而降低底板厚度需求而节约钢材用量。

(3) 该桥弯扭耦合效应显著, 支座反力不均匀现象明显, 同一桥墩处的两支座反力差异可达 22.2%, 在支座选型时应进行差异化设计。

(4) 在立交桥设计中, 必要时可采用九十度弯曲钢箱梁桥方案, 其匝道中心线半径可小至 40 m, 但需采用全桥精细化仿真模型, 并结合空间影响面加载进行全面的受力分析, 以确保结构安全且经济, 尤其应避免出现支座脱空甚至上部结构倾覆风险。

基金项目

湖南省自然科学基金项目(2024JJ9081)。

参考文献

- [1] 袁文金, 张潮忠. 高墩架设曲线钢箱梁技术研究[J]. 公路, 2023, 68(4): 181-185.
- [2] 卢二侠, 王解军. 小半径曲线钢箱梁桥固结体系及戴帽施工法[J]. 公路工程, 2020, 45(3): 143-148.
- [3] Wei, B., Yue, N., Yu, P., Zhou, S. and Jiang, L. (2024) Experimental and Numerical Study on Honeycomb T-Beam Bridge Deck. *Engineering Failure Analysis*, **164**, Article 108686. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108686>
- [4] 孙军, 岳真宏. 曲线钢箱梁施工抗倾覆稳定性研究[J]. 公路, 2021, 66(2): 156-160.
- [5] 康崇杰, 戴公连, 粟淼, 刘文硕. 斜交薄壁连续钢箱梁桥设计与受力特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015(1): 119-126.
- [6] 杨长庚, 何文, 杨孟刚, 等. 小半径曲线钢箱梁桥顶推施工地震行为研究[J]. 公路, 2025, 70(7): 89-98.
- [7] 何知银, 李德建, 马衡. 异形钢箱梁桥空间内力分析[J]. 土木工程, 2017, 6(2): 196-205.
- [8] 刘建威, 于鹏, 李德建. S 型曲线钢箱梁桥空间受力特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 427-434.
- [9] 郑小博, 蒋昆昆, 侯炜, 等. 曲线钢箱梁桥面板力学行为及构造优化研究[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(5): 19-27.
- [10] 常柱刚, 张红显. 曲线异形双层人行钢桁梁力学性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(6): 1475-1480.
- [11] 杨柳, 张清, 王阳建, 等. 曲线钢箱梁平转体施工悬臂状态有限元分析[J]. 中外公路, 2020, 40(5): 125-129.
- [12] Liu, J.W., Li, D.J. and Yu, P. (2019) Study on Optimization Algorithm of Tuned Mass Damper Parameters to Reduce Vehicle-Bridge Coupled Vibration. *PLOS ONE*, **14**, e0215773. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215773>
- [13] Zhou, S., Yu, P. and Nie, J. (2022) Static and Dynamic Characteristics of Steel-Concrete Composite Track Beam of Straddle Monorail with Cluster-Distributed Studs. *Advances in Civil Engineering*, **2022**, Article 9570045. <https://doi.org/10.1155/2022/9570045>
- [14] 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.
- [15] 李德建. 土木工程结构分析程序设计原理与应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2014.