

异形分叉钢箱梁人行天桥设计与分析

郭子鹏¹, 魏超²

(1. 山东轨道交通勘察设计院有限公司, 山东 济南 250100; 2. 山东金衢设计咨询集团有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 随着城市化进程的持续推进,兼具功能性和景观性的异形钢结构人行天桥正逐渐成为城市基础设施建设的重要选择。但异形钢箱梁桥受力复杂,采用梁格模型或单梁模型计算时,结果往往存在偏差。为此,以某简支32 m、Y形钢箱梁人行天桥工程为背景,通过建立板单元有限元模型,分析了异形分叉钢箱梁的设计特点及其在人群、温度等荷载作用下的受力特征。结果表明:异形分叉钢箱梁在纵向弯曲、扭转、畸变等方面存在较大不确定性,通过合理设置横隔板等措施,可以减小不规则外形带来的影响,满足工程设计要求。

关键词: 人行天桥;钢箱梁;异形;板单元;扭转;畸变

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0278-05

Design and Analysis of Special-shaped Forked Steel Box Beam Pedestrian Overpasses

GUO Zipeng¹, WEI Chao²

(1. Shandong Rail Transit Survey and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250100, China; 2. Shandong Jinqu Design Consulting Group Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: With the continuous advancement of urbanization, the special-shaped steel structure pedestrian overpass combining functionality and landscape is gradually becoming an important choice for the construction of urban infrastructure, but the force of special-shaped steel box beam bridge is complex. When using the beam-grid model or the single-beam model for calculation, the results often have deviations. Therefore, taking a 32-m simple-supported Y-shaped steel box beam pedestrian overpass as the background, and through the establishment of plate element finite element model, the design features of the special-shaped forked steel box beam and its force characteristics under the action of loads such as crowds and temperature are analyzed. The results show that the special-shaped forked steel box beam has the considerable uncertainties in terms of longitudinal bending, torsion and distortion. By reasonably setting up transverse partitions and other measures, the influence brought by irregular shapes can be reduced to meet the engineering design requirements.

Keywords: pedestrian overpass; steel box beam; special-shaped; plate element; torsion; distortion

0 引言

随着城市化进程的持续推进,居民对城市景观的审美需求日益提高,这使得城市桥梁设计不仅要满足地面交通以及人流过街的要求,同时对外观造型的创新性和艺术性也提出了更高的期望^[1-3]。兼具功能性和景观性的异形钢结构人行天桥逐渐成为城市基础设施建设的重要选择。

异形天桥相对于直线跨越地面道路的天桥,在承受各类荷载时,纵向弯曲、扭转、畸变以及第2体系等作用叠加明显,极易出现局部应力集中现象。

已有不少学者对异形钢箱梁进行研究,如吴振等^[4]、周旋等^[5]研究了大跨度异形分叉车行钢箱梁桥的受力;程炜钢等^[6]研究了大跨度异形人行钢箱梁桥的动力特性。

本文以某市人行天桥工程为例,建立空间有限元分析模型,研究异形分叉钢箱梁在人群、温度等荷载作用下的受力特点,以期城市异形钢箱梁天桥的设计提供参考。

1 工程概况

该天桥为老桥拆除重建工程,原天桥为钢梁结构,跨中桥墩间距7.5 m。因桥墩直接占用东山路行车道,压缩了地面车辆通行空间,易造成交通拥堵,并存在安全隐患。基于此,对现状天桥实施拆除,并

收稿日期: 2026-01-19

作者简介: 郭子鹏(1993—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

在原址新建 1 座人行天桥。桥位处东侧为实验小学,西侧为居民小区。该区域在上下学高峰时段,机动车、非机动车和过街人流高度叠加,交通流线复杂,行人过街安全风险突出。新建天桥采用 Y 形钢箱梁结构连通 T 型路口,实现多方向人流高效过街,同时最大限度地减少对地面交通的影响。

新建天桥平面布置图见图 1;新建天桥实景图见图 2。

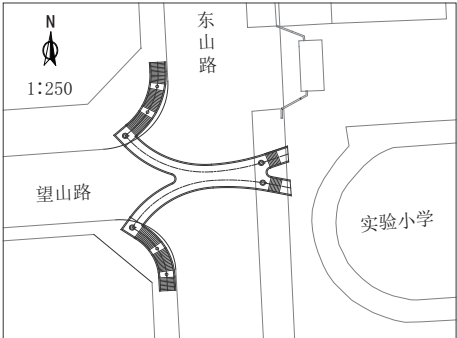


图 1 新建天桥平面布置图



图 2 新建天桥实景图

2 结构设计

2.1 总体设计

规划部门提出天桥原址处上下学时段拥堵严重,希望方便学生及家长过街,减少交通拥堵及等待时间。基于上述考虑,天桥采用单跨过街,东山路西侧采用 Y 形分叉连接望山街南北两侧,并采用弧形梯道落地,贴合路口圆弧段,以尽量减少对路口的影响。东山路东侧梯道与实验小学操场二层衔接,学生可由操场二层直接入校,以减少东山路东侧经校门入学的人数。

2.2 钢箱梁设计

天桥采用对称曲线拼接而成,东侧曲线半径 $R=45\text{ m}$,西侧分叉段曲线半径 $R=21.5\text{ m}$,西侧支点位置采用直线,适合梯道搭接。天桥整体通过多段曲线衔接组合,形成兼具功能性(分叉)与景观性(流畅曲线)的 Y 字形结构。

天桥主梁采用单箱多室鱼腹式结构,钢箱梁采用钢厂预制、现场支架拼装焊接的施工方式。全桥

共采用 4 道中腹板,1 号与 2 号腹板间距、3 号与 4 号腹板间距均控制在 1.2 m ,通过调整 2 号与 3 号腹板间距来满足曲线要求。

钢箱梁构造平面图见图 3。

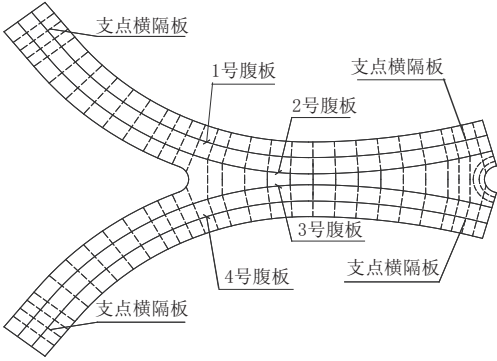


图 3 钢箱梁构造平面图

合并段钢箱梁为单箱 5 室的截面,桥面最窄处宽度 5.5 m ,最宽处 8.7 m 。分叉段钢箱梁为单箱 3 室的截面,桥面等宽为 3.5 m ,天桥主梁合并段及分叉段梁高均为 1.5 m 。全桥设置 4 个圆形板式橡胶支座,主要板件厚度见表 1。

表 1 板件厚度					单位:mm
底板	顶板	腹板	支点横隔板	横隔板	加劲肋
16	14	14	16	10	12×120

3 结构计算

3.1 异形分叉钢箱梁桥有限元模型建立

计算模型作为结构分析的基础,需真实反映结构自身特征及其力学响应规律,这是保证分析结果可靠性的前提。钢箱梁作为薄壁构件,其受力特征较普通实体杆件更为复杂,还会产生局部横向挠曲、扭转、畸变等问题。在常规直线天桥的设计过程中,通常采用传统 6 自由度单梁法计算,该方法模型简单、计算速度快,适合设计单位快节奏的项目推进习惯;缺点是无法考虑局部横向挠曲、约束扭转、畸变等作用的影响。

20 世纪 60 年代莱特福和绍柯提出了梁格法,70 年代汉勃利提出了通过对纵横梁截面刚度进行修正,以使其受力与实际桥梁结构相近的理论。但该方法的计算精度在很大程度上受人为影响。2021 年,黄燕萍^[7]对薄壁钢箱梁结构受力的实用精细化分析方法进行了研究,提出了模拟钢箱梁的板壳有限元模型。

本文采用 MIDAS Civil 软件建立三维板单元有限元模型进行分析计算,并根据《城市人行天桥与人行

地道技术规范》(CJJ 69—1995)、《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)等相关规范进行荷载施加及验算。由于人行桥荷载要小于车行桥荷载,且不允许材料进入屈服阶段,因此忽略材料非线性的影响。全桥共建立 15 621 个节点,19 492 个单元(见图 4),钢材材料特性见表 2。

表 2 钢材材料特性

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/ GPa	剪切模量/ GPa	热膨胀 系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
Q355D	7 850	0.3	206	790	1.2×10^{-5}

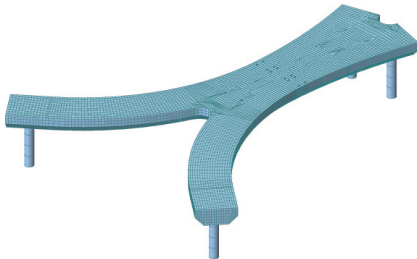


图 4 板单元计算模型

3.2 计算分析

软件计算时考虑了结构自重(根据图纸用钢量反推自重系数)、桥面铺装与栏杆等二期荷载、人群荷载、整体升降温、梯度升降温、雪荷载。根据计算结果,顶底板最大应力均位于钢箱梁分叉的鼻端位置,其中全桥最大应力位于钢箱梁鼻端底板与弧形装饰板衔接边缘,为 143.1 MPa(见图 5、图 6);人群荷载下最大挠度 15.9 mm,1 阶竖向自振频率为 4.72 Hz,支座均未出现负反力,满足《城市人行天桥与人行地道技术规范》的要求。



图 5 整桥应力俯视云图(单位:MPa)

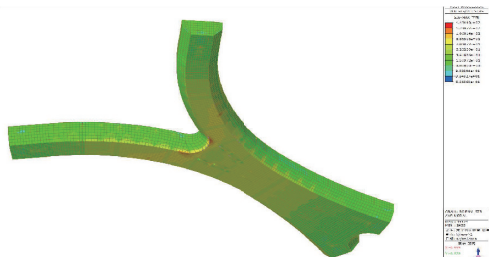


图 6 整桥应力仰视云图(单位:MPa)

显然,图 5、图 6 所示的应力云图与常规直线天桥的受力状态存在较大区别。在常规直线天桥项目

中,钢箱梁最大应力通常是底板跨中的拉应力或者底板中支点的压应力。若采用单梁计算,则无法考虑因主梁分叉带来的扭转、畸变等的影响。

3.2.1 顶底板应力

从顶底板应力云图中可以看出,顶底板最大应力均位于主梁分叉的鼻端边缘位置。顶板最大压应力为 111.6 MPa;底板最大拉应力为 143.1 MPa。因此,在实际设计过程中,为保证结构受力合理及耐久性,应增加鼻端圆弧半径,减轻应力集中现象。在常规直线天桥设计中通常不考虑弧形装饰板的受力,对其板厚的选取并不严格,但通过板单元模型分析可知,异形分叉钢箱梁最大应力位置位于底板与弧形装饰板的焊接位置。为保障这一焊接位置的耐久性,应适当增加弧形装饰板的厚度,并严格控制焊缝质量。

3.2.2 腹板、横隔板应力

腹板最大剪应力和最大主应力云图见图 7、图 8。

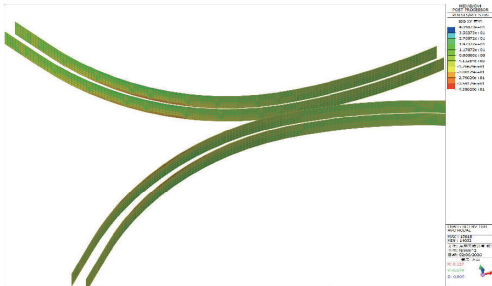


图 7 腹板最大剪应力云图(单位:MPa)

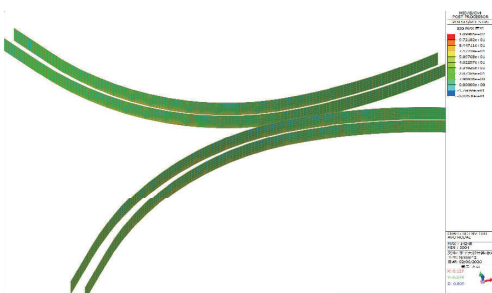


图 8 腹板最大主应力云图(单位:MPa)

由图 7、图 8 可见,腹板最大剪应力位于 1 号、4 号腹板分支段,为 43.9 MPa;最大主应力位于 4 号腹板分支段,为 109.9 MPa。由此可见,腹板最大剪应力未出现在支点位置,而是出现在腹板 3/4 位置,与常规单梁模型剪应力最大值出现在支点位置相悖。

在箱梁分叉鼻端设置加强横隔板,可改善钢箱梁分支段带来的扭转、畸变影响。由横隔板最大剪应力和最大主应力云图(见图 9、图 10)可以看出,最大剪应力位于横隔板与 2 号、3 号腹板相交位置,为 37.8 MPa;最大主应力位于横隔板与 2 号、3 号腹板相

交位置,为 75.3 MPa。而且,本模型为简化计算,未考虑人孔对横隔板的削弱影响,真实数值应更大,但剪应力应该不超过 155 MPa,能满足《公路钢结构桥梁设计规范》要求。

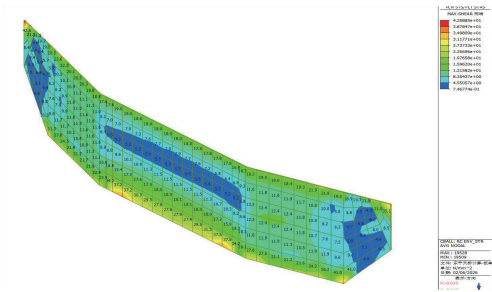


图9 横隔板最大剪应力云图(单位:MPa)

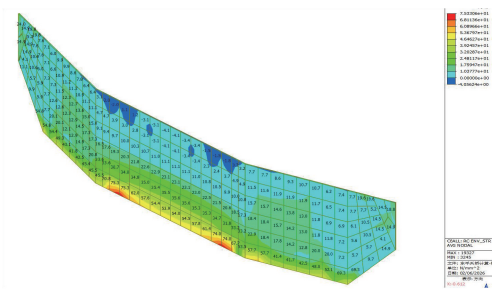


图10 横隔板最大主应力云图(单位:MPa)

在常规直线钢箱梁计算中,若采用6自由度单梁计算,横隔板通常作为加劲措施处理,除支点位置横隔板外通常不需验算受力。若异形钢箱梁存在宽度较大箱室,横隔板长度较大且受力复杂,或箱梁受地面道路净空等条件限制而使梁高较小,横隔板高度较小且需设置人孔,导致横隔板有效截面较小,则需通过建立板单元模型来计算横隔板受力。

3.2.3 扭转分析

薄壁箱梁的扭转分为自由扭转、约束扭转。其中自由扭转主要基于圣维南扭转理论以及符拉索夫提出的“刚周边假定”,假定薄壁箱梁在扭转过程中截面保持不变;薄壁箱梁发生自由扭转时,截面只有剪应力而不产生正应力。薄壁箱梁发生约束扭转时,既产生正应力又产生剪应力,国内已有学者在此基础上开展了深入研究^[8-12]。

通过对模型顶板位移的统计,分支段箱梁因扭转产生的位移差为 2.6~6.2 mm。其中支点位置内外侧位移差值为 6.2 mm;靠近合并段鼻端位置内外侧位移差值约 2.6 mm,位移差值呈现逐渐缩小的趋势,反映出钢箱梁扭转由分支段向合并段逐渐缩小并产生反向扭转的趋势。合并段箱梁结构对称、刚度大,变形较小且以横向挠曲为主。分支段顶板竖向位移见表 3。

表3 分支段顶板竖向位移 单位:mm

位置	支点	点位1	点位2	点位3	点位4	点位5	点位6
内侧	2.7	-5.0	-9.8	-15.9	-23.1	-35.2	-45.9
外侧	-3.5	-6.7	-11.2	-16.4	-22.4	-32.9	-43.3
差值	6.2	1.7	1.4	0.5	-0.7	-2.3	-2.6

删除模型横隔板,仅保留支撑位置处横隔板,对相同位置位移进行统计,结果见表 4。

表4 删除模型横隔板后的分支段顶板竖向位移 单位:mm

位置	支点	点位1	点位2	点位3	点位4	点位8	点位6
内侧	2.8	-4.9	-9.6	-15.9	-23.3	-36.8	-51.1
外侧	-3.7	-9.5	-17.4	-26.2	-36.4	-47.9	-52.2
差值	6.5	4.6	7.8	10.3	13.1	11.1	1.1

对比表 3、表 4 后不难发现,因支点横隔板及主梁限制,两者内外侧竖向位移差值变化不大;但在远离两端约束位置,删除模型横隔板后的内外侧位移差值最大达到 13.1 mm(包含畸变带来的影响),钢箱梁扭转效应非常明显,同时鼻端位置底板最大拉应力达到 216 MPa,顶板最大压应力达到 193 MPa。由此可见,横隔板对于曲线钢箱梁扭转以及最大正应力控制均有很好的效果。

3.2.4 畸变分析

1933 年,艾伯纳发表基于折板理论的畸变解析法,首次明确将截面周边变形纳入薄壁杆件扭转问题,标志着畸变理论研究的开端。后续诸多学者在此基础上逐步完善了薄壁杆件畸变的理论体系^[13-16]。

现有理论认为,畸变既产生纵向应力,也产生横向弯曲应力。其中纵向应力分为畸变正应力和畸变剪应力。在异形钢箱梁的计算中,无法精确地将纵向弯曲、扭转、畸变以及第 2 体系等作用产生的应力完全区分开,因此本文仅通过钢箱梁变形来定性分析畸变对异形钢箱梁产生的影响。

选取模型分支段钢箱梁中间节段查看其变形,同时为了增加对比,删除模型横隔板,仅保留支撑位置处横隔板,查看相同位置处的变形(模型变形放大 10 倍便于观察),如图 11、图 12 所示。

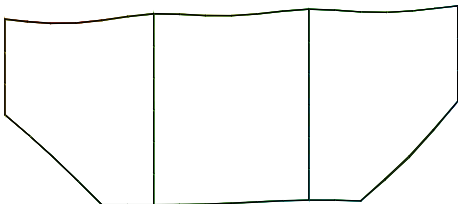


图11 箱梁截面变形(有横隔板)

由图 11、图 12 可见:钢箱梁在未设置横隔板时的畸变非常明显;设置横隔板后,钢箱梁畸变受到约束,将钢箱梁变形放大 10 倍后依然微小,甚至没有

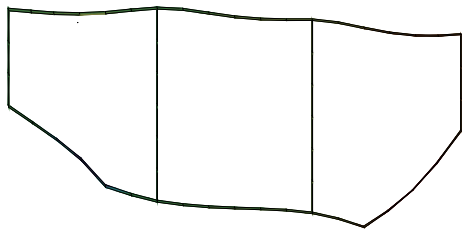


图12 箱梁截面变形(无横隔板)

顶板因承受人群荷载而产生的横向挠曲明显。另外,在设置6 cm 钢筋混凝土桥面铺装后,整桥刚度会有所增加,此时桥面板横向弯曲以及钢箱梁畸变又会相应减小。因此,薄壁钢箱梁按照规范设置横隔板后,箱梁在偏心荷载作用下产生的畸变并不大,能满足实际工程设计需求。

4 结 语

(1)异形分叉钢箱梁鼻端位置受力较为复杂,在实际工程设计中应尽量增加鼻端圆弧半径,减小应力集中现象,同时采用合理焊缝形式并保证焊缝质量。

(2)分叉钢箱梁分支段扭转形式与曲线半径、两端限制形式相关,可能出现反向扭转,因此在分叉及曲线半径较小位置应适当加密横隔板。

(3)扭转、畸变对曲线段箱梁顶底板应力影响较大,横隔板的合理间距及刚度是曲线钢箱梁设计的关键。

参考文献:

[1] 唐晓辉,吕麦霞,易磊.城市商务区空中连廊规划设计[J].市政技术,2019,37(4):17-19;25.

[2] 吕琴琴.城市过街天桥景观形象设计研究[J].合肥学院学报(社会科学版),2014,31(1):90-93.

[3] 孙仕,梅宝平,魏炜,等.异形钢结构景观连廊设计[J].城市道桥与防洪,2025(8):185-189.

[4] 吴振,柳建设,屈东洋.大跨度异形分叉钢箱梁设计与分析[J].城市道桥与防洪,2025(8):138-141.

[5] 周旋.大跨度分叉异形连续钢箱梁设计分析[J].中国建筑金属结构,2021(3):66-67.

[6] 程炜钢,徐伟,孙勇,等.大跨度异形人行钢箱梁桥动力特性分析及设计参数优化[J].南京工程学院学报(自然科学版),2011(9):16-21.

[7] 黄燕萍.薄壁钢箱梁结构受力实用精细化分析方法研究[D].福州:福州大学,2021.

[8] 夏桂云,李传习,杨美良.薄壁箱梁约束扭转的有限元分析及弯扭力矩新算法[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(1):85-92.

[9] 张元海,何嘉祥,王晨光,等.开闭混合断面薄壁梁约束扭转分析[J].建筑结构学报,2020,41(2):166-172;190.

[10] 金成棣.箱形梁桥扭转计算的差分算法[J].上海力学,1982,(3):59-68.

[11] 胡启平,张默雷.考虑畸变时两室薄壁箱梁的约束扭转分析[J].广西大学学报(自然科学版),2014(4):755-759.

[12] 张元海.薄壁箱梁的挠曲扭转有限元分析[J].土木工程学报,1995,28(6):28-36.

[13] 张士铎,刘吉柱.单室薄壁梯形箱梁的畸变应力[J].北京工业大学学报,1987,13(1):79-92.

[14] 徐勋,强士中.薄壁箱梁畸变分析理论的研究[J].工程力学,2013,30(11):192-201.

[15] 汪洋生,张元海.斜腹板薄壁箱梁横向内力分析及其参数影响研究[J].铁道学报,2017(3):104-111.

[16] 王晨光,张元海.几何特性对薄壁箱梁畸变效应的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2020(1):89-95.