

张拉索膜人行拱桥设计研究

郭相利

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 张拉索膜结构近年来在大型公共建筑中得到了广泛的应用,然而在桥梁工程鲜有应用。介绍了某张拉索膜人行拱桥的设计思路,并采用 MIDAS Civil 和 ABAQUS 分别对结构进行整体和局部分析。结果表明,人行桥竖向刚度大,结构应力水平较低,受力合理。索膜结构不但参与结构受力,还可充当人行桥顶棚,满足为行人遮阴避雨的功能要求,实现了结构和功能的统一。局部分析结果显示,整体分析模型中采用可考虑翘曲效果的七自由度梁单元模拟受力复杂构件时精度较差。相关设计思路和分析结果可为今后同类工程提供参考。

关键词: 张拉索膜;人行桥;局部分析;翘曲应力

中图分类号: U448.11

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)01-0114-05

Research on Design of Tension-cable Membrane Arch Footbridge

GUO Xiangli

[Architectural Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Tongji University, Shanghai 200092, China]

Abstract: The tension-cable membrane structure has been widely used in large public buildings in recent years, but it is rarely applied in bridge engineering. The design idea of a tension-cable membrane arch footbridge is introduced, and the overall and local structures are analyzed by using MIDAS Civil and ABAQUS respectively. The results show that the vertical stiffness of the footbridge is large, the structural stress level is lower, and the stress is reasonable. The cable-membrane structure not only participates in the structural force, but also acts as the roof of the footbridge to meet the functional requirements of shade and rain shelter for pedestrians, which realizes the unity of structure and functions. The local analysis result shows that in the overall analysis model, the accuracy of the seven-degree-of-freedom beam element considering the warping effect is poor when simulating the complex components under stress. The related design ideas and analysis results can provide the reference for similar projects in the future.

Keywords: tension-cable membrane; footbridge; local analysis; warping stress

0 引言

张拉索膜结构兴起于 20 世纪中期,常用做屋盖结构,因其适应跨度大、自重轻、造型优美、透光性好等优点,近年在大型体育馆和展览馆等大型公共建筑中得到了广泛应用,如卡塔尔卢塞尔体育场、英国泰晤士河畔的千年穹顶和昆山市专业足球场^[1]。

张拉索膜结构在桥梁工程中鲜有应用,本文以深圳市某景观人行拱桥为例,介绍索膜结构在景观人行桥中的应用,为今后类似工程提供参考。

1 工程概况

项目位于深圳市华为公司坂田园区的北侧,跨

越城市主干道五和大道,道路西侧在现有水质净化厂楼顶开发了体育运动公园,为方便道路东侧办公楼内员工往返市政公园,减少对地面交通的干扰,在上盖体育公园处新建人行天桥,行人可通过天桥直达上盖体育公园。

天桥设计结合华为坂田园区的科技元素和上盖体育公园的运动元素,以“云之桥”为设计概念,将张拉索膜结构应用于人行桥,索膜结构不但参与塑造“云之桥”的景观造型,还是拱桥的主要受力构件,实现了结构受力和景观造型的和谐统一。与此同时,索膜结构还可作为人行桥顶棚,为行人遮阴避雨,满足了深圳地区对人行桥必须设置顶棚的要求^[2],人行桥效果如图 1 所示。

2 张拉索膜结构的力学性能

张拉索膜结构是一种通过直接对膜结构施加拉

收稿日期: 2024-03-31

作者简介: 郭相利(1988—),男,工学硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

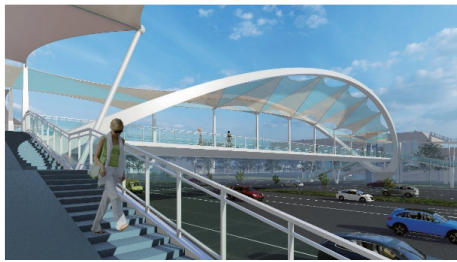


图 1 人行桥效果图

力以获得刚度并承担外部荷载的结构体系。当荷载较小时,可以通过膜面内力直接将荷载传递给边缘构件,形成整体式张拉膜结构,当荷载较大时,由于轻薄膜材的局部承载能力较差,难以单独受力,因此需要与钢索结合形成索膜组合结构^[3]。

张拉索膜结构是一种柔性结构,张拉前索膜不具有固定形状,无法承受外荷载。只有对膜结构和索施加拉力后,索膜结构获得几何刚度,才能保持一定的几何外形并承受外荷载。索膜结构的形状和边界条件、预应力分布、外荷载大小等因素密切相关,“找形分析”是索膜结构设计的首要内容,实际工程实践中常采用非线性有限元法,此外还有动力松弛法、力密度法等。索膜结构设计还包括荷载分析,用于验算索膜结构在外荷载作用下的变形和应力是否满足要求。另外,膜结构设计还需进行裁剪分析,用于确定膜结构的平面裁剪样式。

3 结构设计

3.1 总体布置

人行桥采用拱桥结构,桥梁总长 62.888 m。拱肋采用钢箱形截面,计算跨径为 5.8 m,矢高 11.08 m,桥宽为 5.3 m。主桥东西两侧分别布置 1:2.3 人行梯道和 1:4 推车坡道,梯坡道宽 3.3 m。拱桥采用张拉索膜结构,拉索系统采用 Y 形钢吊杆和索膜张拉顶棚的形式,外观更加简洁。为增加结构竖向刚度,在跨中处增加一对平衡索,人行桥结构三维示意如图 2 所示。

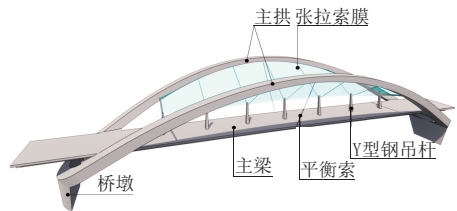


图 2 人行桥三维示意图

3.2 结构设计

3.2.1 拱肋设计

拱肋采用钢箱形截面,拱肋跨中段钢箱宽度为 1.2 m,截面高度为 0.7 m,顶底板腹板厚度为 16 mm,

拱肋拱脚段为等截面,钢箱宽度为 1.5 m,截面高度为 1.2 m,顶底板、腹板厚度为 25 mm,拱肋跨中截面与拱脚截面之间采用线性过渡。

3.2.2 索膜结构设计

本桥吊杆系统为张拉索膜结构,膜结构采用 PETT 膜结构,并设置边索、脊索和谷索。边索与膜材采用膜套的连接方式,即将膜材卷曲成套并将边索包裹于其中,利用膜套与索体之间的摩擦力防止索膜滑移;膜材在高处交汇处底部设置脊索,为保证景观效果,将膜材接缝处设置于脊索处;膜材在低处交汇处底部设置谷索,谷索通过膜套与膜材连接。3 种拉索和膜材的连接示意图见图 3。

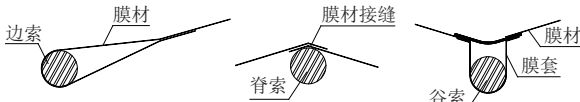


图 3 拉索和膜结构连接示意图

拉索连接拱肋和竖直刚性吊杆,为桥面提供竖向支承。拉索纵向间距为 5.7 m,脊索和谷索采用环氧涂层钢丝双层 HDPE 索体,型号为 LZM5-19,边索均为 LZM5-12。在跨中位置外侧一对平衡索,以增加人行桥竖向刚度,型号为 LZM5-37,跨中横断面布置如图 4 所示。

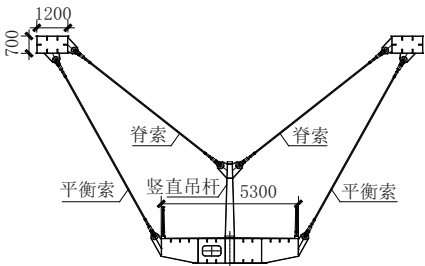


图 4 人行桥跨中横断面图(单位:mm)

索膜结构效果如图 5 所示。



图 5 人行桥索膜顶棚效果图

3.2.3 主梁结构

纵梁采用钢箱梁,顺桥向等截面布置。纵梁截面顶面宽为 5.3 m,底面宽为 2.85 m,挑臂长为 1.425 m。纵梁布置 2 道腹板,腹板间距为 2.45 m,梁高为 1.0 m,主要结构板厚为 10 mm。横隔板标准间距为 1 900 mm,标准横隔板厚为 10 mm,吊杆处

横隔板板厚为 16 mm,横隔板上设置人孔,孔处设置补强圈板板厚为 10 mm。腹板在横隔板间设置一道加劲板,板厚为 10 mm。

3.2.4 墩-拱-横梁固结构造设计

主梁与拱肋之间通过横梁连接,横梁截面为平行四边形。横梁顶、底板与拱肋隔板位置对应,并与拱肋腹板焊接;横梁腹板与拱肋顶底板焊接;横梁顶底板与主梁顶底板对齐,采用熔透焊;横梁横隔板与主梁腹板位置对应。横梁顶、底板和腹板板厚为 14 mm,横梁直腹板厚度为 12 mm。桥墩与拱肋之间相关板件采用熔透焊,相交处结构内部设置横隔板和加劲肋以确保内力平顺过渡。钢结构桥墩采用地脚螺栓与混凝土承台连接,桥墩底部设置法兰盘,板厚为 40 mm,与桥墩之间采用熔透焊。

墩-拱-横梁固结处三维示意如图 6 所示。

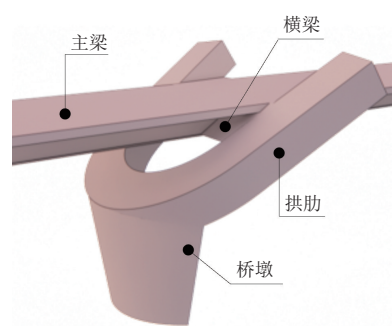


图 6 拱肋横梁固结三维示意图

4 整体分析与验算

4.1 计算模型

结构整体分析采用 MIDAS Civil 2022(V1.0)进行分析,拱肋、主梁和桥墩采用梁单元进行模拟,索采用桁架单元模拟,膜结构采用板单元模拟,仅用于模拟纵横桥向风荷载对结构的作用,群桩基础刚度采用弹性支承模拟并施加于承台底部,拱脚和桥墩固结处采用刚臂模拟,梁单元考虑翘曲效果(七自由度),有限元模型见图 7。

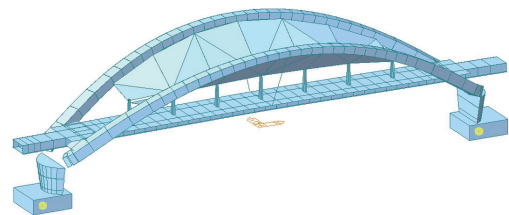


图 7 桥梁有限元模型

4.2 分析与验算结果

4.2.1 应力验算

计算钢结构拱桥应力时应根据规范考虑剪力滞

和局部稳定受压翼缘对钢结构有效截面的折减。对于拱肋,还应考虑受压构件的整体稳定折减系数。可对有限元模型中的单元计算结果进行放大,放大系数为各折减系数乘积的倒数。

承载能力基本组合效应下,钢结构拱桥各个关键截面的应力结果见表 1,结构应力均小于规范规定的最大值 275 MPa。脊索最大应力为 368.0 MPa,安全系数 $1\ 760/368.0=4.5>2.5$,满足规范要求。需要指出的是,计算模型中尚未考虑索膜协同受力,索膜结构具体由专业厂家进行深化设计,深化设计成果应经设计单位审核确认后方可施工。

表 1 拱桥应力主要验算结果

验算位置	应力/MPa	放大系数	放大后应力/MPa
拱肋跨中上缘	-112.4	1.25	-140.5
拱肋横梁相交处上缘	-189.0	1.05	198.5
纵梁跨中上缘	76.6	1.0	122.5
横梁下缘	-99.0	1.0	-99.0
拉索	368.0	—	—

根据计算模型结果,拱肋与横梁固结处产生了很大的翘曲应力,翘曲应力为 109.1 MPa,占组合应力比例超过 50%,该固结节点处需承受弯剪扭等内力,受力复杂,整体模型中梁单元已无法反应该节点处实际受力,局部分析结果详见下文。

4.2.2 挠度验算

活载作用下,主梁跨中最大挠度为 25 mm,跨中最大反拱值为 1 mm,正负挠度之和为 26 mm,小于规范限制 $55\ 800/800=70\ \text{mm}$,故桥梁结构刚度满足要求。

4.2.3 桥梁自振频率验算

采用 MIDAS Civil 对桥梁结构进行特征值分析,得到 5 阶以内振动模态频率和振型,如表 2 所列。

表 2 自振频率与振型

阶数	频率/Hz	振型描述
1	2.02	主梁一阶纵桥向平动
2	2.24	主梁一阶横摆
3	3.36	拱肋水平面内一阶扭转
4	3.50	主梁一阶竖向弯曲
5	3.55	主梁二阶横摆

第 4 阶振型如图 8 所示,拱桥竖向基频为 3.5 Hz,满足规范不小于 3 Hz 的要求。

5 局部分析与验算

5.1 计算模型

本桥拱脚处结构复杂,拱肋与桥墩固结,横梁与

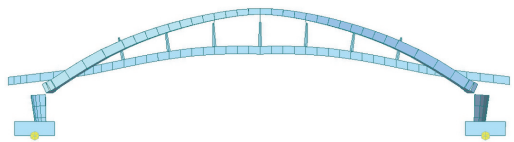


图8 第4阶振型

拱肋固结,整体模型中杆系单元无法反应复杂节点受力情况,故针对拱脚处节点,进行详细分析^[4]。为真实考虑拱脚处结构实际受力情况,应用大型通用有限元程序 ABAQUS 2022 建立拱脚段的局部空间仿真模型。为减少边界条件模拟对计算结果的影响^[5],模型中拱肋取至拱肋-横梁固结点以上 4.5 m 处,距离大于 3 倍拱肋截面尺寸,模型中主梁取至靠近第一根吊杆处,距离横梁大于 3 倍梁高。在局部分析模型的桥墩底部施加固定约束,在拱肋和主梁截断截面形心处施加总体计算模型中提取的最不利截面内力和位移,并将截断面上所有节点刚性连接于截面形心,以保证断面符合平截面假定。

局部模型采用 Hypermesh 与 ABAQUS 联合仿真。利用 Hypermesh 强大的网格划分功能,进行网格划分。拱脚结构各板件采用 ABAQUS 软件中的 S4R 壳单元模拟,共建立 58 906 个单元,56 804 个节点,划分网格后 Hypermesh 模型见图 9。

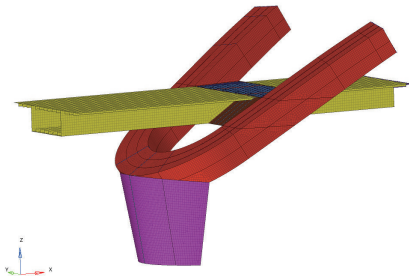


图9 网格划分后 Hypermesh 模型

5.2 局部分析结果

5.2.1 拱肋应力结果

提取整体计算模型中拱肋和横梁固结处应力最大时相关截面内力和位移数据,将其输入 ABAQUS 局部分析模型中,得到拱肋应力云图,见图 10。

由图可知,拱肋最大应力出现在拱肋和横梁相交处,最大 Mises 应力为 126.8 MPa,大幅小于整体计算模型中的 198.5 MPa。整体模型中翘曲应力计算误差较大的原因是该节点受力复杂,需承受很大的弯矩、剪力和扭矩,实际构造中根据受力特点设置了横隔板和加劲肋,可有效的减少翘曲效应,而整体计算梁单元模型中无法考虑横隔板和加劲肋等有利构造,由此导致翘曲计算应力偏大。

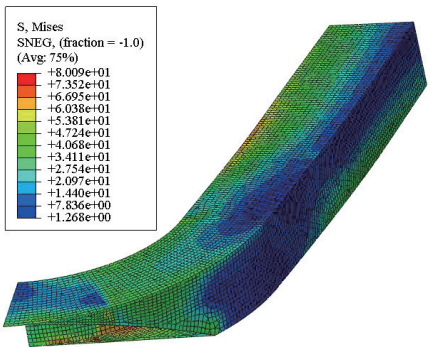


图10 拱肋 Mises 应力分布(单位:MPa)

5.2.2 横梁应力结果

横梁顶底板和腹板应力云图,见图 11。

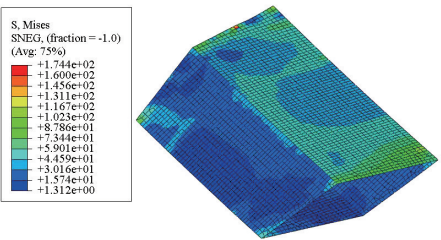


图11 横梁顶底板和腹板 Mises 应力分布(单位:MPa)

由图可知,最大应力出现在拱肋和横梁相交处,最大 Mises 应力为 174.8 MPa,其余单元应力均小于 100 MPa。

横梁横隔板和加劲肋应力云图见图 12。

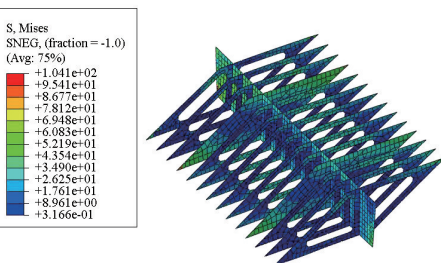


图12 横梁横隔板和加劲肋 Mises 应力分布(单位:MPa)

由图可知,横梁横隔板和加劲肋最大 Mises 应力为 104.1 MPa,满足规范要求。

5.2.3 桥墩和拱肋固结处应力结果

提取整体计算模型中桥墩和拱肋固结处应力最大时相关截面内力和位移数据,将其输入 ABAQUS 局部分析模型中,得到桥墩和拱肋顶底固结处结构应力云图,见图 13。

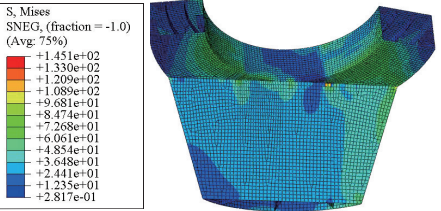


图13 横梁横隔板和加劲肋 Mises 应力分布(单位:MPa)

由图可知,最大 Mises 应力为 145.1 MPa,满足规范要求。

6 结 语

本文介绍了深圳市一座索膜结构人行拱桥的设计思路与结构分析结果,通过对该桥的研究,可以得出以下结论。

(1)采用可考虑翘曲效果的七自由度梁单元模拟薄壁钢结构可能会得到不准确的结果,因为七自由度梁单元无法考虑横隔板和加劲肋等可降低翘曲应力的构造措施,从而导致翘曲应力偏大。

(2)张拉索膜结构应用于人行拱桥中取得了较好的效果,索膜结构不但作为主要承重构件参与结构受力,还是人行桥结构顶棚,为行人遮阴避雨,实

现了结构与功能的统一。

(3)该桥膜结构综合单价约为 350 元/m²,采用索膜结构可节省人行桥顶棚的费用,且膜结构可参与结构受力,减少了吊杆的用量,该桥型总体上经济性较好。

参考文献:

- [1] 喀则·吾鲁格,薛素铎,李雄彦.索膜结构找形方法研究进展[J].建筑结构,2023,53(增刊1):488-492.
- [2] SJG 70—2020,深圳市人行天桥和连廊设计标准[S].
- [3] 柏玉.柔性气囊结构水弹性响应的数值研究[D].大连:大连理工大学,2022.
- [4] 胡健琛.混合结构拱脚设计方法研究[J].城市道桥与防洪,2019(6):246-248.
- [5] 周云岗,洪慧卿,鄢余文.大跨径钢箱系杆拱桥拱梁结合段局部受力分析[J].中国市政工程,2021(1):8-11,83.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

