

# 横向非对称钢拱桥设计及 BIM 应用

李 杰

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

**摘 要:** 随着交通行业的发展,跨径大、复杂程度高的桥梁越来越经常被采用,BIM 技术在此类工程中的应用越来越广泛。针对一座非对称钢拱桥的设计要点进行梳理,从设计角度概述此类桥梁的设计流程和设计难点,并采用 BIM 三维技术参与协同设计,论述 BIM 技术在设计过程中发挥的作用及价值。

**关键词:** 横向非对称钢拱桥;体系设计;BIM;设计流程

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)07-0078-05

## 1 工程概况

本项目位于浙江省,紧邻新建工程上游为现状旧桥,旧桥建于 20 世纪八十年代末期,至今已经运营 30 多年,为双向 2 车道桥梁。随着城市发展,交通流剧增,旧桥所在路段经常发生拥堵。为了解决城市核心区过江交通拥堵问题,拟在现状旧桥下游新建半幅桥梁,即本项目的新建桥梁工程(如图 1 所示)。



图 1 项目效果图

新建桥梁采用跨径为 176 m 的下承式钢箱拱桥,拱高 50 m 左右,桥面宽度 22.5~23.1 m。纵桥向支座间距 170 m,横桥向支座间距为 18 m。主拱为八边形钢箱拱,拱脚断面尺寸 4.5 m(高)×2.2 m(宽),拱顶断面尺寸为 2.5 m(高)×2.2 m(宽),拱轴线为 1.7 次抛物线。主梁采用分离式双箱系梁形式,系梁标准段断面尺寸为 2.5 m(高)×2 m(宽)。全桥共 26 对吊索,吊杆下锚点间距为 6 m,上锚点间距 4 m。桥梁总体布置如图 2、图 3 所示。

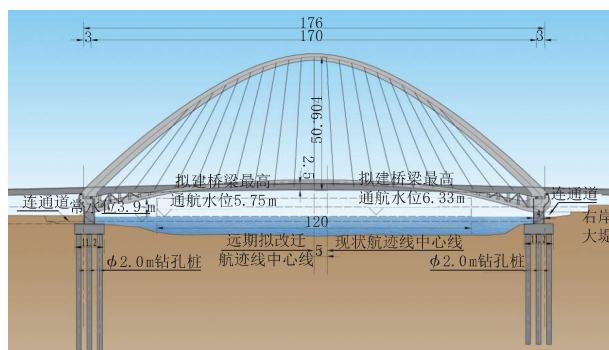


图 2 主桥立面图(单位:m)

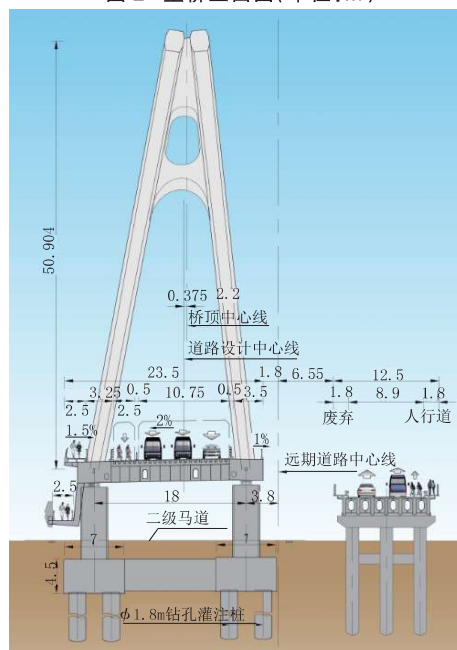


图 3 主桥断面图(单位:m)

## 2 设计流程

设计流程如图 4 所示。

收稿日期: 2021-02-04

作者简介: 李杰(1988—),男,工学硕士,工程师,从事桥梁设计及BIM技术研究及应用工作。

## 3 桥梁体系设计

本桥为新建半幅桥梁,远期上游旧桥拆除后建设另外半幅桥梁。新建桥梁单侧设置人行通道,通过悬挑的形式与主梁相连,作为景观慢行系统方便行人从

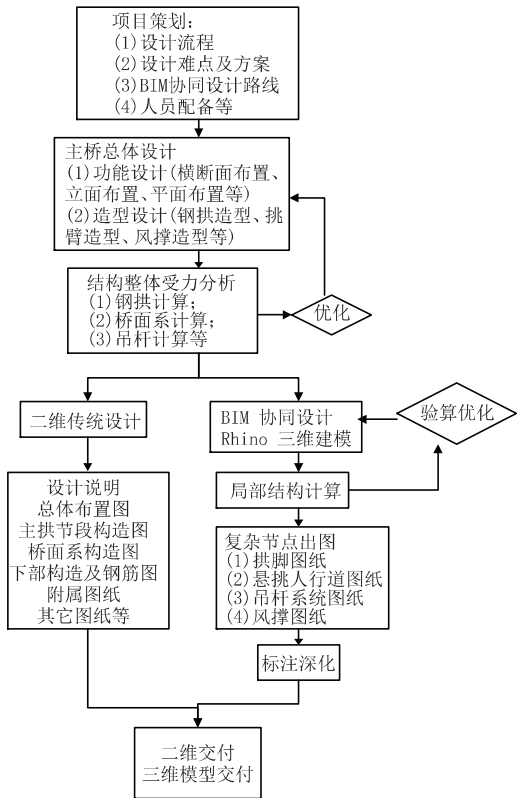


图4 设计流程图

桥头下方上桥。悬挑人行道的设置使得主桥为横向非对称结构。另外叠加主拱线型、吊杆布置间距和桥梁整体造型等因素,使得本桥结构体系较为复杂,同类型桥梁设计案例非常少,需要进行开创性的特殊设计。主桥计算模型如图5所示。

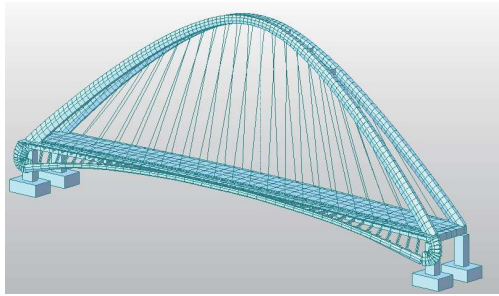


图5 主桥计算模型

3.1 钢拱横偏设计

由于悬挑人行道的存在,桥面系承受的恒载和活载在横桥向非对称,导致主拱必须在横向进行非对称布置才能使整体结构受力最优。分别将主拱设置成横偏0 m(对称布置)、1 m、2 m、4 m、6 m、7.562 5 m(内拱竖直)六种情况进行分析,如图6所示。

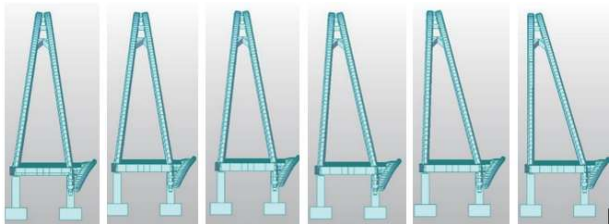


图6 主拱横偏距离(对称布置→内拱竖直)

(1)反力对比

本桥采用外部静定结构体系,边界条件约束方式见图7。1号为固定支座,2号、4号为单向活动支座,3号为双向活动支座。其中1-4侧为悬挑人行道侧,即外侧。支座布置如图7所示。



图7 边界约束条件

支座反力计算结果见表1、表2。

表1 恒载作用下各支座反力统计

|                      | 支座 | 拱肋<br>对称 | 横偏<br>1 m | 横偏<br>2 m | 横偏<br>4 m | 横偏<br>6 m | 内拱<br>竖直 |
|----------------------|----|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 顺桥<br>向反<br>力<br>/kN | 1  | 629      | 80        | -507      | -1637     | -2768     | -3638    |
|                      | 2  | -629     | -80       | 507       | 1637      | 2768      | 3638     |
|                      | 3  | 0        | 0         | 0         | 0         | 0         | 0        |
|                      | 4  | 0        | 0         | 0         | 0         | 0         | 0        |
| 竖直<br>向反<br>力<br>/kN | 1  | 14 783   | 14 534    | 14 278    | 13 775    | 13 274    | 12 883   |
|                      | 2  | 9 232    | 9 483     | 9 737     | 10 245    | 10 757    | 11 157   |
|                      | 3  | 9 304    | 9 492     | 9 680     | 10 060    | 10 443    | 11 157   |
|                      | 4  | 14 711   | 14 525    | 14 335    | 13 961    | 13 588    | 13 296   |

表2 标准组合作用下各支座反力统计

|                      | 支座 | 拱肋<br>对称 | 横偏<br>1 m | 横偏<br>2 m | 横偏<br>4 m | 横偏<br>6 m | 内拱<br>竖直 |
|----------------------|----|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 顺桥<br>向反<br>力<br>/kN | 1  | -2 581   | -3 196    | -3 850    | -5 124    | -6 407    | -7 415   |
|                      | 2  | -4 093   | -3 480    | -2 837    | -1 637    | -475      | 405      |
|                      | 3  | 0        | 0         | 0         | 0         | 0         | 0        |
|                      | 4  | 0        | 0         | 0         | 0         | 0         | 0        |
| 竖直<br>向反<br>力<br>/kN | 1  | 21 263   | 21 010    | 20 750    | 20 240    | 19 732    | -19 337  |
|                      | 2  | 14 500   | 14 756    | 15 016    | 15 535    | 16 059    | -16 470  |
|                      | 3  | 14 217   | 14 402    | 14 590    | 14 967    | 15 350    | -15 652  |
|                      | 4  | 20 802   | 20 619    | 20 435    | 20 071    | 19 710    | -19 427  |

支座选取时最大反力为  $21\,263 \times 1.1 = 23\,389\text{ kN}$ ,因此选取 25 MN 的支座型号。支座水平承载力选取 20%,即 5 000 kN,大概可以适用横偏 3 m 范围内的方案。

(2)变形对比

根据计算结果,恒载作用下关键位置处位移见表3。

随着横偏值增大,拱顶位置处横向往外侧位移值逐渐减小,主拱 1/4 位置处在横偏 1~2 m 时会反凸,系梁跨中位置处内凸值越来越大。综合考虑,主拱在横偏 1~2 m 时,主要位移指标是较优的取值范围。

表3 恒载作用下关键位置处的位移统计

| 位置               | 拱肋<br>对称    | 横偏<br>1 m | 横偏<br>2 m | 横偏<br>4 m | 横偏<br>6 m | 内拱<br>竖直 |
|------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 拱顶               | 77          | 65        | 50        | 23        | -5        | -30      |
| 横桥向<br>位移<br>/mm | 主拱<br>1/4 处 | 20        | 5         | -10       | -40       | -50      |
|                  | 系梁<br>跨中    | -2        | -9        | -17       | -31       | -45      |
| 竖向位<br>移/mm      | 拱顶          | -80       | -78       | -78       | -79       | -82      |
|                  |             |           |           |           |           | -86      |

### (3) 应力趋势对比

根据计算结果, 恒载作用下关键位置处应力见表4、表5。

表4 恒载作用下关键位置处的应力统计 单位: MPa

| 位置 | 拱肋<br>对称 | 斜偏<br>1 m | 斜偏<br>2 m | 斜偏<br>4 m | 斜偏<br>6 m | 内拱<br>竖直 |
|----|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 拱顶 | -118     | -119      | -119      | -120      | -121      | -122     |
| 左拱 | 无索区      | -217      | -212      | -210      | -204      | -201     |
|    | 系梁<br>跨中 | 142       | 137       | 130       | 121       | 113      |
| 右拱 | 拱顶       | -114      | -113      | -114      | -112      | -112     |
|    | 无索区      | -149      | -152      | -156      | -163      | -170     |
|    | 系梁<br>跨中 | 142       | 147       | 152       | 165       | 178      |

表5 基本组合作用下关键位置处的应力统计 单位: MPa

| 位置 | 拱肋<br>对称 | 斜偏<br>1 m | 斜偏<br>2 m | 斜偏<br>4 m | 斜偏<br>6 m | 内拱<br>竖直 |
|----|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| 拱顶 | -49      | -48       | -48       | -48       | -48       | -49      |
| 左拱 | 无索区      | -123      | -121      | -120      | -116      | -113     |
|    | 系梁<br>跨中 | 29        | 26        | 24        | 15        | 12       |
| 右拱 | 拱顶       | -42       | -41       | -42       | -41       | -42      |
|    | 无索区      | -66       | -67       | -69       | -73       | -78      |
|    | 系梁<br>跨中 | 29        | 31        | 35        | 44        | 52       |

随着横偏值的增大, 左右系梁的应力差越来越大, 左右主拱的应力差越来越小。综合考虑, 兼顾主拱和系梁的受力, 横偏 1~2 m 是较优的方案。

### (4) 小结

综合考虑上述三个方面, 经过详细设计, 本桥主拱最终采用横偏 2 m 的设计方案。

## 3.2 桥面体系设计

目前钢拱桥桥面系一般有两种体系: 组合桥面板和钢桥面板。此两种体系在一般钢拱桥中各有优劣, 对比见表6。

但是本桥为非对称结构, 该特殊性导致施工过程中主要结构受力会有比较大的不同。

### (1) 组合桥面板体系

表6 两种体系优劣对比

| 桥面<br>体系        | 优点                                              | 缺点                                                                      |
|-----------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 组合<br>桥面板<br>体系 | 1. 桥面板使用耐久性好;<br>2. 混凝土材料较钢材便宜, 经济性较好           | 1. 恒载重量大, 增加钢拱的用钢量;<br>2. 施工难度稍大, 对吊装机械要求高; 如果采用预制桥面板, 接缝位置处钢筋施工难度大     |
| 钢桥<br>面板<br>体系  | 1. 钢桥面板体系恒载较小, 减少钢拱的用钢量;<br>2. 施工较为方便, 对吊装机械要求低 | 1. 正交异性钢桥面板活载疲劳问题严重, 耐久性较差;<br>2. 经济性较组合桥面板差;<br>3. 现场焊接工作量大, 焊接质量控制难度大 |

组合桥面板体系的施工步骤如下:

搭设少支墩支架→吊装系梁节段、横梁节段和小纵梁节段, 形成网格结构→拱圈转体施工→安装预制桥面板, 第一次张拉吊杆→拆除桥下支架→浇筑桥面板湿接缝, 施工铺装层→安装栏杆等, 第二次张拉吊杆→成桥通车。

组合桥面板系杆拱桥为了减小混凝土桥面板内的轴力, 一般在施工时吊杆张拉先于混凝土桥面板形成整体, 这样系梁不能形成整体协同受力体系, 会导致系梁产生横向弯曲, 进而造成内外侧系梁应力沿纵向分布非常不均, 如图8所示。

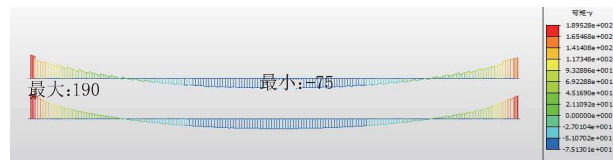


图8 吊杆张拉后系梁横向应力图(单位: MPa)

由图8可以看出, 系梁在吊杆横向水平分力的拖拽下, 系梁端部应力为 190 MPa, 跨中应力为 -75 MPa, 应力分布非常不均。这是由于吊杆张拉时, 桥面板还未施工, 桥面系统在横向还未形成整体, 非对称结构下吊杆存在水平分力, 造成系梁横向弯曲。

### (2) 钢桥面板体系

钢桥面板体系施工步骤:

搭设少支墩支架→吊装系梁、横梁、桥面板等形成整体→拱圈转体施工→安装并张拉吊杆→施工桥面系附属→第二次张拉吊杆→成桥通车。

钢桥面系方案的施工步骤有别于组合桥面板方案之处在于, 张拉吊杆前桥面系已经形成一个整体, 其横向刚度比较大, 左右两个系梁、桥面板和横梁可以整体承受吊杆张拉产生的水平分力, 此时系梁横向应力如图9所示。



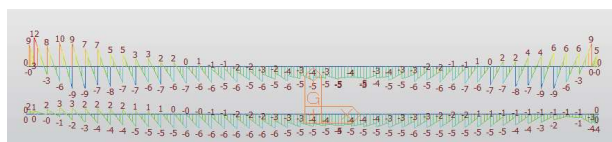


图9 吊杆张拉后系梁横向应力图(单位:MPa)

由图9可以看出,系梁在吊杆水平分力的拖拽下,横向应力较小,只有12 MPa左右。且根据系梁横向应力图可知,系梁应力基本上处于均匀的锯齿状,说明钢桥面板整体刚度可以有效抵抗吊杆的水平分力作用。

### (3)小结

通过上述两种体系的对比,结合本桥结构及受力的特殊性,桥面体系选择采用钢桥面板体系。

### 3.3 吊杆布置及拱轴线设计

本桥由于景观造型需要,主拱拱轴线和吊杆布置较为特殊,分别从这两方面考虑对结构受力的影响。

由于吊杆下吊点为横梁位置处,横梁为3 m,下吊点间距为6 m,因此仅对上吊点的间距按照不同设置距离和拱轴线线性匹配进行受力分析,结果如图10、图11所示。

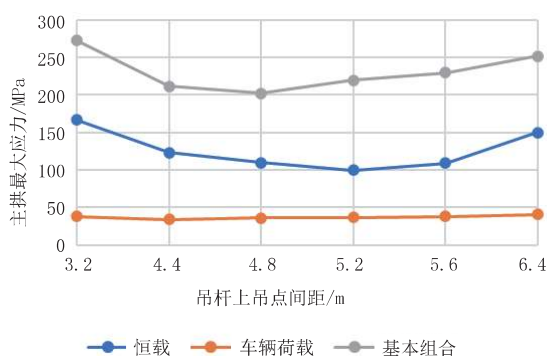


图10 吊杆上吊点间距与主拱最大应力的关系

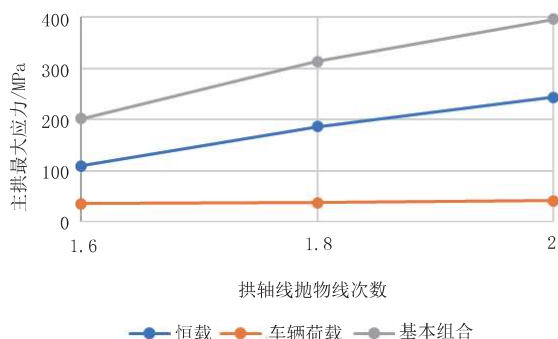


图11 拱轴线抛物线次数与主拱最大应力的关系

由图10、图11可以看出,上吊点间距为4.8 m左右且抛物线次数越低时,主拱最大应力较小。但是随着抛物线次数降低,拱脚处主拱和主梁夹角会越来越小,不利于主拱轴向力传导。因此本桥采用上吊点间距4.8 m,拱轴线为1.8次抛物线的方案。

## 4 BIM 协同设计

本桥有主拱为八边形断面、半幅桥横向单坡、横向非对称、空间吊杆布置等特点,关键节点处的传统二维设计不能准确定位板件位置,采用BIM技术的三维可视化、参数化、模拟性辅助复杂节点的设计。本项目采用Rhino(犀牛)软件建立全桥三维模型,并重点对拱脚、悬挑人行道、风撑等复杂构件设计进行介绍。主桥三维模型如图12所示。

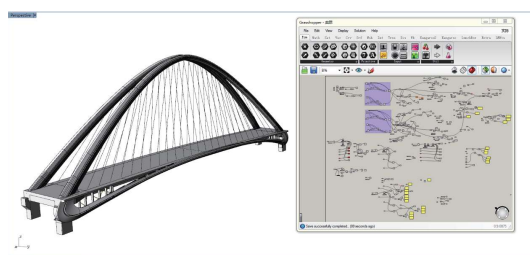


图12 主桥 Rhino 三维参数化模型

### 4.1 拱脚设计

#### (1)方案选型

本桥拱脚包括拱梁结合点区域和拱墩结合区域,主拱在桥面位置断开,桥面以上部分与系梁形成下承式钢拱桥,桥面以下部分与桥墩固结,并且沿悬挑人行道外侧布置。全桥爆炸图如图13所示。

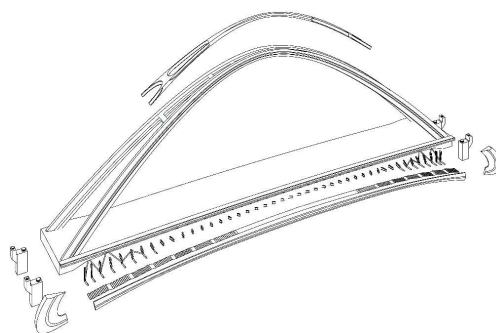
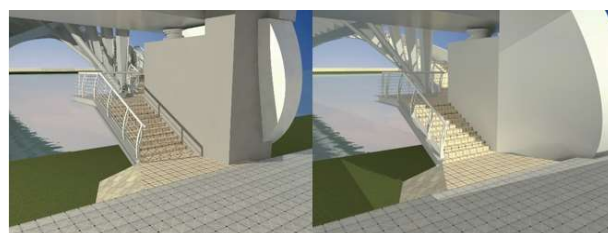


图13 主桥组成构造分解

主拱在拱脚位置发生空间扭曲,构造非常复杂。利用Rhino强大的NURBS曲线功能,建立拱脚空间模型,清晰地展示拱脚位置拱结构和桥墩的冲突融合情况(见图14),用于方案优化。根据行人角度视觉效果最终选择图14(a)所示的方案一。



(a)方案一

(b)方案二

图14 拱墩结合区域融合方案展示

当确定方案后,从Rhino导出拱墩结合区构造dxf格式文件,辅助设计人员进行二维图纸的绘制,如图15所示。

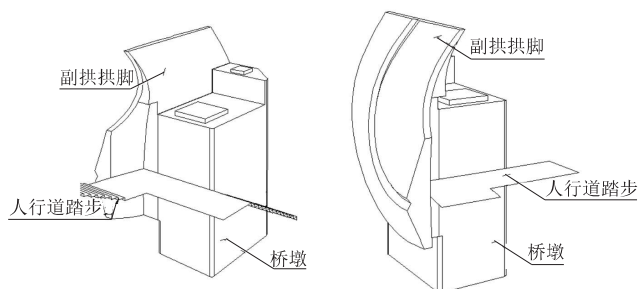


图15 拱墩结合区 Rhino 导出图

### (2) 拱脚构造设计

主拱为八边形断面,系梁为矩形断面。在拱脚位置处,主拱在系梁顶板处断开,主拱板件采用熔透焊的方式与系梁顶板相接。在焊接位置处,系梁内部设置竖向支撑板,从顶板贯穿至底板,主拱轴力分别转换为系梁拉力和支座反力。由于拱脚内主板和加劲板设置非常复杂,建立全板件的拱脚三维模型。通过三维剖图方式得到准确的二维构造图,设计人员补充标注后即可生成可交付的图纸,如图16所示。

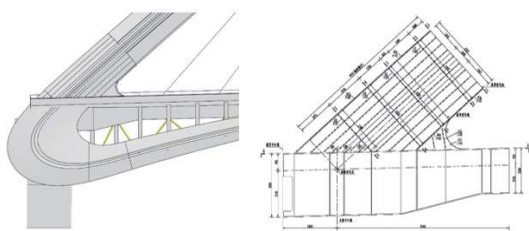


图16 拱梁结合段三维图及 Rhino 导出图

### (3) 拱脚受力分析

通过三维模型进行ANSYS局部受力分析,计算得到的拱脚区域整体Mises应力如图17所示。根据计算结果可知,整个拱梁结合段的Mises应力基本都在200 MPa以下。

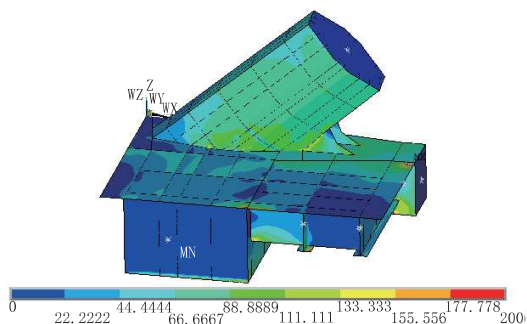


图17 拱脚整体 Mises 应力云图(单位:MPa)

## 4.2 悬挑人行道设计

### (1) 构造设计

悬挑人行道从河堤桥墩内侧延伸至桥面人行道

外侧,走向为三维空间线位。支撑悬挑人行道的构造设计采用工字钢与系梁焊接,间隔与系梁间的横梁保持一致,为3.6 m。工字钢之间采用钢管相连,形成框架体系,以承受沿悬挑人行道纵向的偏位。最终形成的悬挑人行道效果图如图18所示。



图18 悬挑人行道效果图

### (2) 净空复核

本项目人行道净空标准为2.5 m,采用模型的三维可视化,将悬挑人行道面板抬升2.5 m,形成人行净空控制范围,可以直观检查悬挑人行道净空设计是否满足要求,如图19所示。

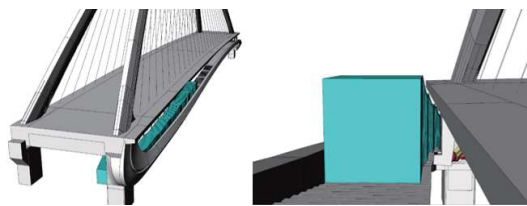


图19 悬挑人行净空复核

## 4.3 风撑设计

在满足受力的前提下,为了使得风撑设计视觉效果达到最优,采用Rhino构建不同的风撑设计模型,进行设计方案比选。

方案一采用钢拱80 m范围内钢板连接的方式,如图20所示;方案二是在方案一的基础上进行了镂空处理,如图21所示。



图20 风撑设计方案一



图21 风撑设计方案二

和避免由于桥面较滑高空中引起的不安全感。雨棚侧面镂空设计,以减少夏天时密闭空间引起的闷热。

由于天桥总桥长较短,行人在桥上停留时间不多,设置雨棚造成天桥体量较大,增加造价,景观总体上感觉喧宾夺主,个人认为如非必要则不建议设置雨棚。若天桥设置在学校附近,则可另行考虑。

### (3) 楼梯桥下方较矮处需设置栏杆

楼梯梯脚处下方锐角区域空间较小,行人在旁边行走或者穿越时容易撞到头部,存在安全隐患,设计时也容易忽略。因此在下方空间较小处设置栏杆围起来,防止人撞到桥,且贴上警示标志。

### (4) 桥上栏杆设置双扶手

主梁和楼梯栏杆扶手根据无障碍设计做法,还需设置低扶手栏杆,保障小孩和残疾人正常通行。

### (5) 楼梯与地面人行道衔接

天桥楼梯前的人行道应与楼梯坡度衔接平顺、与台阶高差应不大于一个踏步高度,防止行人不注意绊倒和局部积水。人行道应设置盲道砖引导避开或者衔接天桥。

## 7 结 语

城市人行天桥的建造与城市生活、文化等紧密相关,本文就人行天桥设计工作中的某些关键问题,从特定的角度进行剖析和总结,希望能为以后的天桥设计提供更多的思路和参考,使建设出的天桥更安全可靠,经济美观,居民出行更方便。

### 参考文献:

- [1] 余凤翔.城市人行天桥设计上的几个问题的探讨[J].城市道桥与防洪,2004,3(2):29-32.
- [2] 胡世强,何大学.城市人行天桥设计探讨[J].城市道桥与防洪,2012,6(6):100-101.

~~~~~  
(上接第 82 页)

通过比选,两种方案钢拱受力相差不大,方案二更显轻巧,视觉效果更优,因此本项目设计最终采用方案二。

## 5 结 语

随着交通行业的发展,越来越多桥梁设计方案采用了跨径大、复杂程度高的桥梁。传统的二维设计手段在此类桥梁中已逐渐力不从心。BIM 技术在

复杂桥梁设计中具备非常大的优势和价值,利用三维模型可以表达传统二维设计无法传递的信息,更直观、更快捷。本文对 BIM 技术的三维可视化和参数化进行了重点应用,BIM 技术更重要的作用是使工程项目信息在规划、设计、施工和运营维护过程的充分共享、无损传递。随着 BIM 技术发展越来越成熟,未来将在项目全生命期内发挥越来越大的作用。