

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.07.021

# 斜跨拱桥的受力分析及斜拉索布置方式比选

庞有贵

(太原市市政工程设计研究院, 山西 太原 030002)

**摘要:**以太原市东中环北延上跨北涧河立交工程为例,介绍斜跨拱桥的受力分析和桥型比选。采用 Midas Civil 大型通用有限元分析软件建立空间有限元计算模型,对“竖琴式”“扭曲面式”和“渔网式”3种拉索体系斜跨拱桥的受力分析进行了比较,得出各种体系的特点,以及指导斜跨拱桥的受力分析和桥型选择。

**关键词:**斜跨拱桥;受力分析;体系比较;桥型选择

中图分类号: U448.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)07-0091-04

## 0 引言

随着社会经济的高速发展和人民生活水平的逐步提高,人们对城市景观的关注度越来越高<sup>[1-2]</sup>。造型新颖优美的桥梁结构既能给人耳目一新的视觉感受,又能体现城市欣欣向荣和创新发展的新气象。斜跨拱桥的空间吊杆和斜跨布置的拱肋组成空间感强烈的结构体系<sup>[3]</sup>,与一般拱桥相比,具有“横看成岭侧成峰,远近高低各不同”的景观变化,能够给人更加强烈的视觉冲击,使其成为地标性景观建筑物。

## 1 工程概况

东中环北延上跨北涧河立交工程位于东中环北延和北涧河快速化改造交点处,南起东中环北延 K1+110,北至 K1+756,总长 646 m[111 m(南引道)+2×30 m(南引桥 23.5 m 宽预应力混凝土连续梁)+40+90+40 m(主桥:单拱斜跨反对称索面斜拉桥,26.5 m 宽等截面钢结构连续箱梁)+4×30 m+3×30 m(北引桥 23.5 m 宽预应力混凝土连续梁)+95 m(北引道)]。桥梁主拱与东中环北延道路中线的夹角约为 27°。东中环北延道路等级为城市主干路,主线上跨路段采用双向六车道加地面辅路的断面形式;主线设计车速为 50 km/h,辅路设计车速为 30 km/h,主桥总体设计如图 1 所示。

本桥位于太原市动物园二期规划散养场和游乐场之间,是一座重要的景观桥梁,景观效果如图 2 所示。

立交桥坐落在北涧河谷,根据周围地形地貌、桥

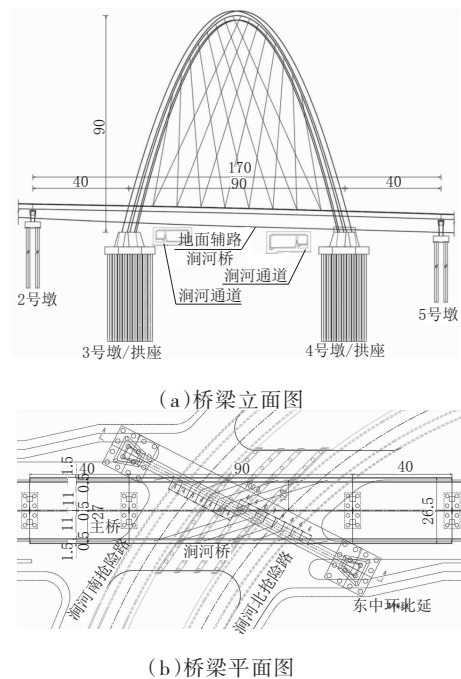


图 1 立交桥总体布置图(单位:m)



图 2 东中环北延上跨北涧河立交桥效果图

梁建筑限界的要求,以及已建成的北涧河快速路主线箱构和涧河桥既有结构等,选择合理的拱高和矢跨比、布索形式和桥梁断面形式,以满足工程的交通功能和城市景观要求。

收稿日期: 2022-07-28

作者简介: 庞有贵(1985—),男,本科,工程师,从事桥梁设计工作。

## 2 主桥结构

### 2.1 钢梁

钢主梁采用单箱四室扁平钢箱梁断面, 两侧用装饰钢板封闭。箱梁顶面为双向 2% 坡度, 底面为水平, 中心位置梁高 2 100 mm, 两侧受横坡影响梁高为 1835 mm。钢箱梁顶板和底板厚 18~22 mm, 中腹板厚 16 mm, 边腹板厚 25 mm。箱梁横隔板标准间距为 2.5m, 在支点处加密; 其中标准横隔板厚 12 mm, 吊点横隔板厚 20 mm, 支点横隔板厚 25 mm。钢箱梁断面如图 3 所示。

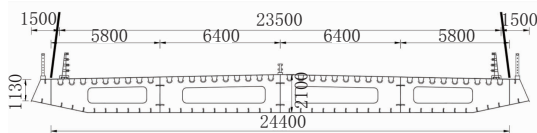


图 3 钢箱梁断面图(单位:mm)

### 2.2 钢拱

全桥设一单拱斜跨, 拱座顶至拱轴线顶的理论高度为 90 m。钢拱截面为倒梯形变截面, 截面高度由拱脚至拱顶线性变化, 拱截面高度由 5 000 mm 变至 3 800 mm, 拱顶板宽度由 5 045 mm 变至 4 325 mm, 底板宽度保持 2 000 mm 不变。钢拱板厚 25 mm, 在拱脚处加厚至 35 mm, 拱内部设有横隔板和纵向加劲肋。钢拱肋断面如图 4 所示。

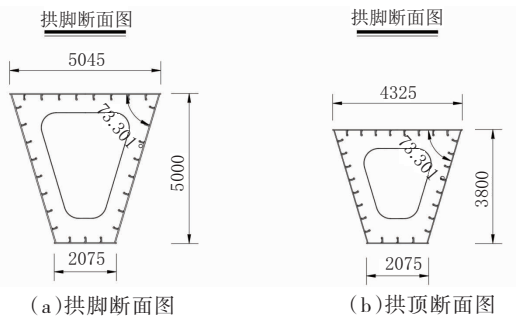


图 4 钢拱横断面图(单位:mm)

钢拱采用完全承压式连接形式锚固于拱座内, 拱脚内部分浇注有混凝土, 混凝土顶面四周的钢板设有泄水孔。

### 2.3 拉索

拉索为空间反对称双索面形式, 拉索顺桥向间距均为 10 m, 共布置 8 对拉索。拉索采用  $\Phi 7$  镀锌高强平行钢丝成品索, 标准强度为 1 670 MPa。拉索采用双层 PE 护套。拉索上锚点和下锚点处均为双耳板结构, 上锚点位于拱肋底板中心线上, 沿拱轴线间距为 4 m; 下锚点位于距设计道路中心线 12.5 m 的箱梁顶板上, 沿梁中心线间距为 10 m。拉索下锚点附近设置套筒用于张拉, 套筒调节长度为 10 cm。

## 3 桥型分析对比

本例采用 Midas Civil 桥梁通用有限元分析软件对斜跨拱桥的“竖琴式”“扭曲面式”和“渔网式”3 种拉索方式进行分析对比。

斜跨拱桥不同于常规拱桥, 由于拱肋与主梁的斜交布置, 结构空间效应明显, 受力比较复杂。本次为了更加直观地对比 3 种拉索体系斜跨拱桥的受力情况, 3 种拉索体系桥梁模型均未考虑施工过程分析。钢箱梁用单梁模型模拟, 钢拱肋用梁单元模拟, 吊杆用桁架单元模拟, 箱梁吊点和箱梁本体通过刚性连接形成鱼骨梁的结构形式模拟。结构主要荷载有桥梁自重、二期荷载、汽车荷载, 暂未考虑其他次要荷载。

(1) 从结构形式、桥梁景观及桥上建筑限界等因素对比 3 种拉索体系斜跨拱桥的桥型特点。3 种桥型特点如表 1 所示。

表 1 桥梁方案对比

桥梁方案	桥型特点	桥梁模型图
方案一: “竖琴式”	与普通下承式拱桥的吊杆设置形式相同, 拱肋上一个点位上的两个吊耳分别与箱梁同一断面上两侧的吊耳设置吊杆。桥梁立面上与下承式拱桥相似, 拱肋较常规拱桥更加高耸, 犹如竖琴一般, 桥梁景观较好。吊杆对桥上建筑限界影响较大	
方案二: “扭曲面式”	与扭曲面拉索斜拉桥的吊杆设置形式相同, 单侧拱肋从拱顶起与同侧箱梁边缘由远及近设置吊杆。桥梁立面上扭转交叉的吊杆和拱肋组成一个皮斗篷的人物造型, 桥梁景观优美。吊杆对桥上建筑限界影响最小	
方案三: “渔网式”	与常规斜拉桥的吊杆设置形式相同, 单侧拱肋从拱顶起与同侧箱梁边缘由近及远设置吊杆。桥梁立面上相互交叉的吊杆和拱肋组成一个渔网的造型, 桥梁景观性好。吊杆对桥上建筑限界影响较小	

(2) 分别通过拱脚反力、主梁反力、拱肋应力、梁应力、拉索轴力等方面对 3 种拉索方式的斜跨拱桥受力进行初步对比分析, 结果如图 5 至图 9 所示。

#### a. 主拱反力

方案二的拱脚推力最小, 方案三次之, 方案一最大。方案三的拱脚面内弯矩最小, 方案二及方案一的拱脚弯矩较方案一大很多。方案一的拱脚面外弯矩最小, 如图 5 所示。综合考虑, 方案三的拱脚反力最优。

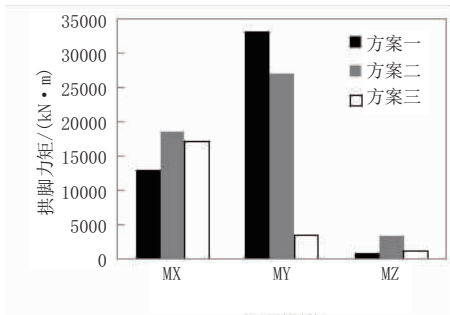
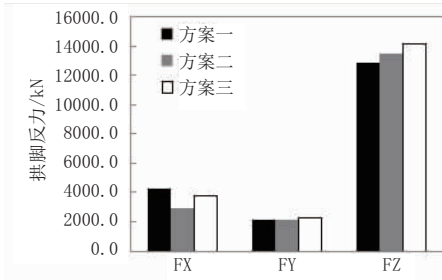


图5 拱脚受力对比分析

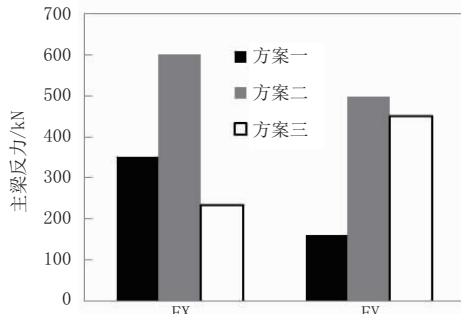


图6 主梁支反力对比分析

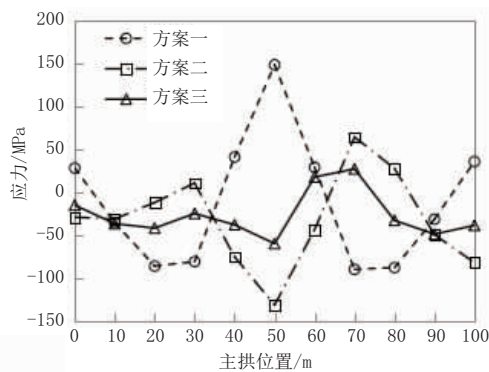


图7 主拱肋应力对比分析

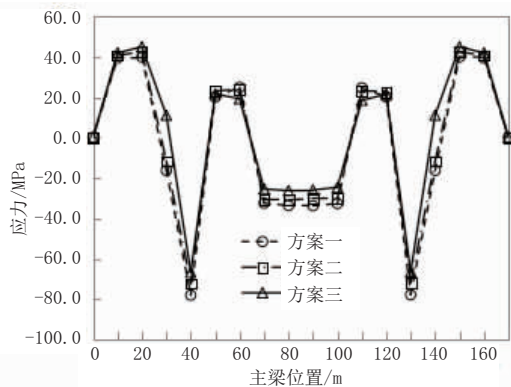


图8 主梁应力对比分析

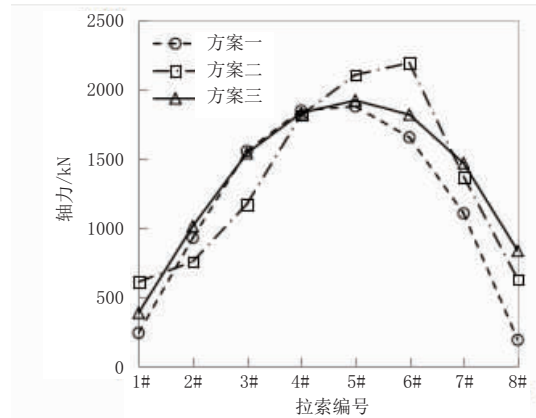


图9 拉索受力对比分析

b. 主梁反力

方案三的纵向反力最小,方案一次之,方案二最大。方案一的横向反力最小,方案二及方案三的拱脚弯矩较方案一大很多,如图5所示。综合考虑,方案一的主梁水平反力综合最优。

c. 拱肋应力

方案一的拱肋应力基本对称,拱顶应力较方案二和方案三大。方案三的拱肋应力最小且分布较均匀,如图7所示。综合考虑,方案三的拱肋应力最优。

d. 主梁应力

三个桥梁方案的主梁应力相差不大,如图8所示。

e. 拉索轴力

方案一和方案三的吊杆轴力分布较为线形,方案一的边吊杆轴力小;方案二的吊杆轴力突变较多,且最大吊杆轴力较方案一和方案三的大,如图9所示。综合考虑,方案三的拉索轴力最优。

(3)分别通过拱肋变形、主梁变形等方面对3种拉索方式的斜跨拱桥刚度进行初步分析对比,结果如图10至图13所示。

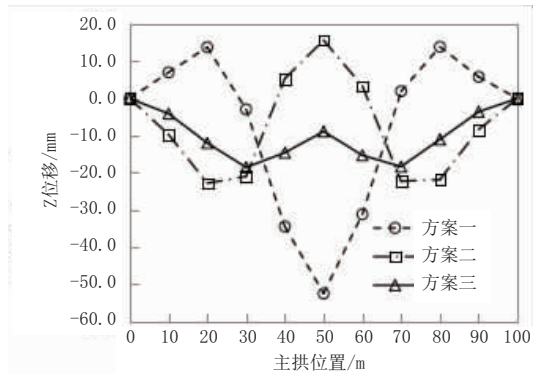


图10 拱肋竖向位移对比分析

a. 拱肋位移

方案三的拱肋竖向位移和面内位移最小,方案一的面外位移最小,方案二的两个水平向位移最大,如图10至图12所示。综合考虑,方案三的拱肋变形



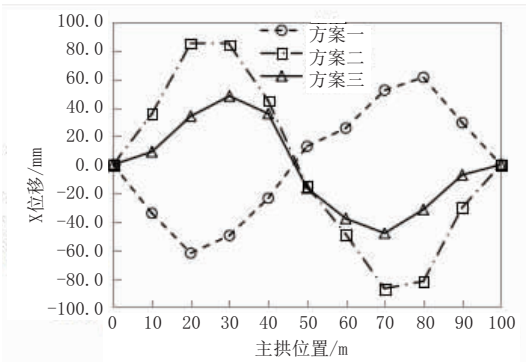


图 11 拱肋面内位移对比分析

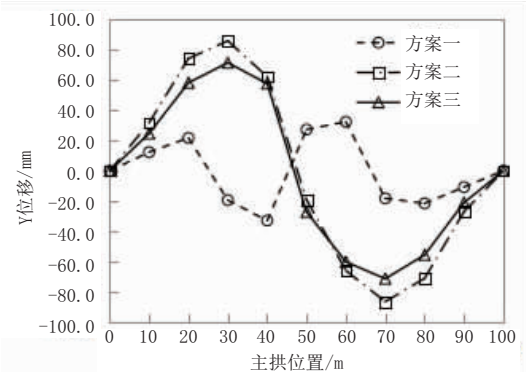


图 12 拱肋面外位移对比分析

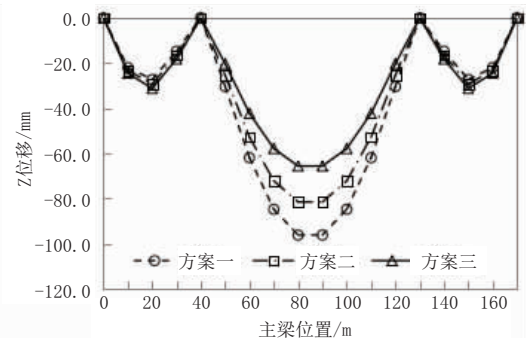


图 13 主梁变形对比分析

最优。

b. 主梁位移

方案三的主梁竖向位移最小,方案二次之,方案一最大,如图 13 所示。综合考虑,方案三的主梁变形最优。

(4)斜跨拱桥的造型奇特,空间效应明显,桥梁的整体稳定性尤为重要。通过屈曲分析,对 3 种拉索方式的斜跨拱桥的整体稳定性进行初步分析对比,结果如图 14 所示。

3 种方案的一阶模态特征值均已超过 20, 方案一为 33.1,方案二为 24.7,方案一为 31.8,稳定性均满足要求。方案一和方案三的特征值相差不大,方案二的高阶模态特征值较其余两种方案的大。

斜跨拱桥外形特立别致,桥梁的 3 种拉索方案在桥梁景观方面各有特点,方案一稳重大气,方案二

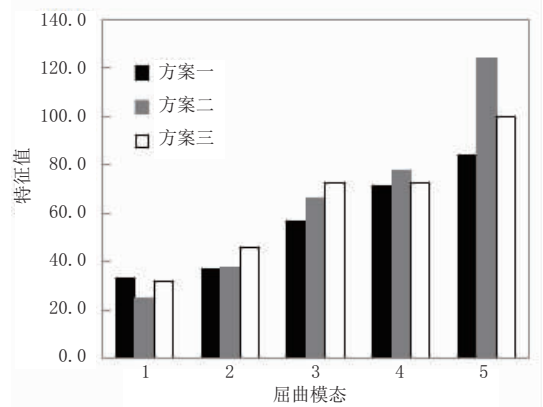


图 14 桥梁特征值对比分析

灵动活泼,方案三千态万状。通过模型侧立面图可发现,方案一的桥上空间最小、最受限;方案二和方案三的桥上空间较好,更有利于主梁的车道布置,桥上空间能够得到更好的利用。

为了直接反映斜跨拱桥 3 种拉索体系的受力情况,桥梁模型未考虑施工过程分析,均为一次落架成型。通过对斜跨拱桥 3 种拉索方案的分析对比,方案一结构受力较差,主要体现为拱脚推力大、拱脚面内弯矩大、拱顶应力大、拱肋竖向位移大、主梁位移大等;方案二结构受力较方案一好,个别指标较大,如拉索受力较大且分布不均匀、拱脚面内弯矩大、拱肋水平位移大、低阶模态特征值较小等;方案三桥梁结构的综合受力性能比较优秀。

综合考虑桥梁景观、建筑限界和结构受力等因素,东中环北延上跨北涧河立交工程采用了方案三“渔网式”的拉索方式。

4 结 语

随着科技的快速发展和经济的高速增长,城市桥梁的景观造型越来越新颖,其中斜跨拱桥因其别致的空间造型受到了青睐,国内已建成的斜跨拱桥有张家口市通泰大桥、太原市北中环跨汾河桥、大连红星大桥、合肥机场高速桥等。本文的 3 种方案各具优势,单从结构体系方面来说,方案三优于方案二,方案二优于方案一。如从景观性上选择方案一和方案二,可以通过施工过程分析,调整成桥方式和吊杆索力来优化整体桥梁结构受力。

参考文献:

[1] 王会利,秦泗凤,张哲,等.斜跨异型拱桥的设计与分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2012,36(6):1160-1165.  
 [2] 吴阳,潘盛山,张哲.单肋对角斜跨拱桥受力性能分析[J].中外公路,2013,33(1):133-135.  
 [3] 张哲.桥梁研发 30 年[M].大连:大连理工大学出版社,2014.