

文章编号:1671-6833(2012)01-0032-04

## 连续多跨矮塔斜拉桥力学性能分析

王艳<sup>1</sup>, 谷定宇<sup>2</sup>, 陈淮<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南徐辉建筑工程设计有限公司, 河南 郑州 450008)

**摘 要:**以开封黄河二桥主桥为研究对象,采用有限元程序 Midas/civil 对该桥进行了力学性能分析. 计算结果表明:由于该桥塔高与跨径之比较大,斜拉索承担较多的竖向荷载,能有效降低主梁支点截面的高度和内力;主梁的内力与变形表现为多跨连续梁的受力特点,主梁基本全截面受压,轴力分布较为均匀,在桥塔根部支点处出现较大正弯矩,跨中出现负弯矩;主梁刚度较大,整体变形以向上为主,变形量较小;主塔只起到拉索转向块的作用,纵向受力较小,故各塔顶纵桥向位移较小,在中等跨径范围内,可采用多跨矮塔斜拉桥方案解决普通多跨斜拉桥的刚度问题;每根塔柱两侧拉索的拉力由内向外依次小幅增大,总体分布均匀,边跨索力最大,活载作用引起的拉索应力增幅较小;桥梁结构在非对称活载作用下的受力更为不利;各构件控制截面应力及变形均在桥梁设计规范规定范围内,且具有足够的安全储备,桥梁结构受力合理.

**关键词:**多跨矮塔斜拉桥;有限元法;力学性能

**中图分类号:** U448.27

**文献标志码:** A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.01.008

### 0 引言

矮塔斜拉桥具有塔矮、梁刚、索集中布置等特点,使得其结构刚度大、结构受力合理. 由于矮塔斜拉桥桥型美观,跨径布置灵活,施工方便等优点,在跨径 100~300 m 范围内具有较强的竞争力<sup>[1-5]</sup>. 国外建造的多跨连续矮塔斜拉桥较少,仅有 10 余座,国内更少<sup>[6]</sup>. 开封黄河二桥是一座 7 塔 8 跨双索面预应力混凝土多跨矮塔斜拉桥<sup>[7]</sup>,主桥跨径为 85 m+6×140 m+85 m,是目前国内一联孔跨总数最多、连续长度最大的矮塔斜拉桥. 该桥主梁采用单箱三室变高度预应力混凝土箱梁,梁高 2.5~5 m,三向预应力体系;主塔采用矩形混凝土截面,塔高 36 m,结构高度 28 m,布置在护栏外侧,与主梁固结,梁底支座支撑在墩上;斜拉索为竖琴式,塔上索距 1 m,梁上索距 4 m,每根塔柱上设 11 对斜拉索,塔顶通过鞍座,对称锚固于梁体上. 该桥的标准跨布置如图 1 所示.

开封黄河二桥的主塔高度与跨径之比较大,孔跨数较多是该桥在结构形式上的独特之处. 一般多跨矮塔斜拉桥桥塔高度与跨径之比大致为 1/7.4~1/14,均值为 1/9.6<sup>[1]</sup>,开封黄河二桥的

主塔高度与跨径之比高达 1/5,主塔高度相对较高;该桥共 7 塔 8 跨,孔跨数较多,且各塔无边锚索固定. 为了解该多跨矮塔斜拉桥在力学性能上的受力特点,采用有限元程序 Midas/civil 建立开封黄河二桥的空间有限元计算模型,对该桥进行力学性能分析,探讨该类桥梁主要构件的受力与变形特点,为同类桥梁的设计与施工提供参考.

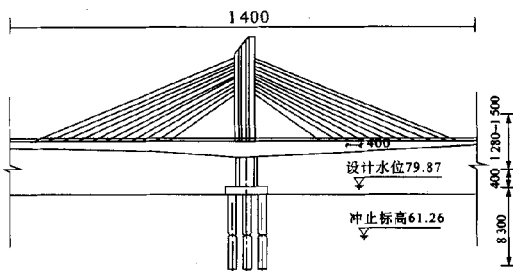


图1 桥梁标准跨布置图(单位:cm)

Fig.1 Standard span layout arrangement of bridge

### 1 有限元模型建立

运用有限元程序 Midas/civil 建立开封黄河二桥主桥空间有限元计算模型,该桥由主梁、主塔、斜拉索、桥墩等主要受力构件组成,根据各构件的

收稿日期:2011-08-20;修订日期:2011-10-29

基金项目:河南省杰出人才计划资助项目(084200510003)

作者简介:王艳(1980-),女,河南清丰人,硕士,郑州大学讲师,主要从事桥梁结构分析工作.

受力特点,选择合适的单元进行模拟.考虑到主梁截面较宽且为闭口箱型截面,抗扭刚度较大,选用常用的“单主梁”模型,即采用一根三维变截面梁单元模拟主梁;主塔与桥墩采用等截面梁单元模拟;拉索采用只受拉桁架单元离散,拉索初张力通过对桁架单元施加初张力来模拟;主梁与拉索之间采用刚臂连接,在程序中选用弹性连接中的刚接模拟实现;塔梁固结,梁墩边界仿照连续梁桥的支座进行处理,即在中间墩顶采用固定铰支座,在其它墩顶采用滑动铰支座.全桥有限元模型共计 896 个节点,804 个单元,桥梁有限元模型如图 2 所示.桥梁结构材料参数根据规范确定.

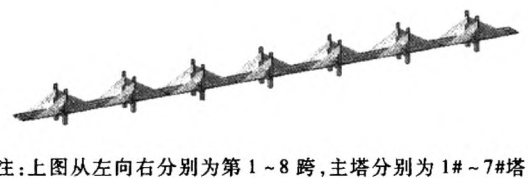


图 2 桥梁有限元计算模型  
Fig. 2 Finite element model of bridge

由于开封黄河二桥主桥刚度较大,跨径较小,结构非线性效应不明显,故在静力性能分析时不考虑非线性的影响.为探讨该桥最不利荷载工况组合,考虑桥梁在 3 种荷载工况的静力行为响应.工况 1:恒载+活载(全桥满布);工况 2:恒载+活载(横桥向半桥布载,纵桥向满布);工况 3:恒载+活载(隔跨全桥布载,即 1、3、5、7 跨布载,2、4、6 跨空载).

2 计算结果与分析

进行上述 3 种工况下结构的静力力学性能计算,由于工况 1 与工况 2 计算结果的规律基本相同,限于篇幅在此仅列出工况 1 和工况 3 的内力与变形图,如图 3、图 4 所示.3 种工况下塔顶位移如表 1 所示.

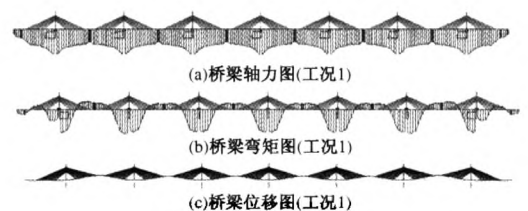


图 3 工况 1 下桥梁内力与变形图  
Fig. 3 The internal force and deformation of bridge under load case 1

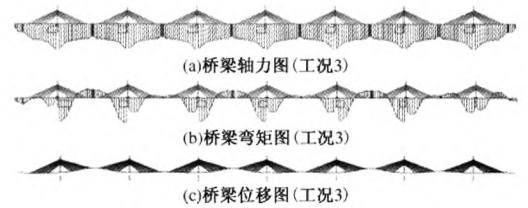


图 4 工况 3 下桥梁内力与变形图  
Fig. 4 The internal force and deformation of bridge under load case 3

表 1 3 种工况下各桥塔顶部顺桥向位移  
Tab. 1 The displacements at the top of pylons in longitudinal direction of bridge under 3 kinds of load cases

	1#塔	2#塔	3#塔	4#塔	5#塔	6#塔	7#塔
工况 1	-16	3	0	0	0	-3	16
工况 2	-18	3	-1	0	1	-3	18
工况 3	-29	20	-17	17	-16	13	6

主梁在工况 1 下,结构受力与变形基本左右对称,由于主梁内纵向预应力的作用使主梁全截面受压,斜拉索张力的水平分力加大了桥塔根部无索区主梁截面的压应力,同时减小了跨中无索区主梁截面压应力,但预应力作用整体较大,主梁整体仍全截面受压.主梁最大压应力出现在第 2 跨支座北侧处截面上缘,为 11.1 MPa.主梁轴力表现出相同的特点,在塔根部压力最大,逐渐向跨中无索区略有减小,除边跨主梁的轴向压力较小外,其余各跨梁的轴力分布较为均匀,如图 3(a).由于塔高与跨径之比较大,故斜拉索张力竖向分力增大,使跨中无索区主梁上部受拉,出现负弯矩,各桥塔根部无索区域的主梁则在自重作用下下部受拉,出现正弯矩,如图 3(b).最大正弯矩为  $1.97 \times 10^8$  MPa,发生在第 2 跨桥塔根部主梁位置,最大负弯矩发生在第 2 跨  $3/8L$  处,为  $7.16 \times 10^7$  MPa,且较桥塔根部主梁正弯矩小很多.主梁变形以向上变形为主,在跨中无索区出现向上较大位移,各桥塔根部处主梁出现向下微小挠度,如图 3(c).全桥最大挠度为第 2 跨跨中,方向向上,为 4.8 cm,远小于规范要求.

主梁在工况 3 下,由于荷载隔跨布置,关于结构不再对称,结构的受力与变形也发生显著变化.主梁基本全截面受压,仅在第 2 跨跨中处截面上缘出现了局部微小的拉应力,为 0.15 MPa.最大压应力仍在第 2 跨支座北侧主梁截面上缘,为 12.4 MPa,满足应力要求限值.主梁轴力的分布与大小和前两种工况基本相同,如图 4(a).主梁

正弯矩在各桥塔根部左右两侧产生突变,空载跨一侧突然增大,跨中无索区主梁负弯矩在空载跨跨中增大,在加载跨跨中略有降低,如图4(b)。第2跨北侧支座处主梁正弯矩最大,为 $3.03 \times 10^8$  MPa;第2跨跨中主梁负弯矩最大,为 $1.04 \times 10^8$  MPa。主梁变形在第3、5、7跨中向上挠度减小,在1、2、4、6跨中挠度有较大增加,第8跨挠度由下变为向上,如图4(c)所示。最大挠度仍为第2跨跨中,方向向上,为8.7 cm,增幅明显,但仍远小于规范要求。

由以上分析可知,由于桥梁塔高与跨径之比较大,斜拉索张力竖向分力增大,拉索承担荷载比例上升,主梁支点截面高度和内力得到有效降低。主梁的受力与变形更多地表现为多跨连续梁的受力特点,主梁基本全截面受压,轴力分布较为均匀。较大的拉索竖向张力导致主梁在桥墩支点处出现正弯矩,跨中出现负弯矩,且支点弯矩远大于跨中弯矩,主梁变形以向上为主,但位移量较小,说明主梁刚度较大。

主塔在工况1下边塔出现向边跨侧侧倾,塔顶偏移量为1.6 cm,中间5个塔的塔顶基本无偏移。桥塔受力主要表现为受压,最大压应力在边塔根部上缘,为9.9 MPa。主塔在工况3下各塔均有不同程度的侧倾,其中1#塔塔顶向边跨侧偏移量最大,为29 mm,2#~7#桥塔偏移量依次减小,如表1所示。各桥塔整体受力表现为偏心受压,最大压应力在2#桥塔根部下缘,为9.73 MPa。由此可知,虽然主塔相对较高,各主塔无边锚索固定,但是由于主梁刚度较大,承担活载比例较大,主塔承担活载比例相应较小,且只起到拉索转向块的作用<sup>[8-9]</sup>,故主塔沿桥梁纵向受力较小,塔顶未出现较大变形。因此,中等跨径范围内,可采用多跨矮塔斜拉桥方案解决普通多跨斜拉桥的刚度问题。

拉索在3种工况下,每根塔柱两侧拉索拉力由内向外依次小幅增大,总体分布均匀。边跨索的索力较其它跨大,边塔外侧第1根拉索与桥塔锚固点处拉应力最大,为788 MPa。活载作用引起的拉索应力增幅较小,约为总应力的3%,说明该桥恒载比重较大。拉索的容许应力更多地取决于拉索的应力幅和斜拉索与主梁刚度之比,一般矮塔斜拉桥最大应力幅仅为普通斜拉桥的 $1/3 \sim 1/2$ <sup>[9-11]</sup>,故容许应力可增大到普通斜拉桥的0.5~0.6倍。

桥墩在工况3下受力最为不利,表现为偏心受压。1#墩的墩顶偏移量最大,根部截面压应力最

大为8.97 MPa,同时上缘出现微小拉应力0.46 MPa,仍满足规范要求。

工况2下结构受力与变形规律与工况1基本一致,由于活载只考虑了半边活载效应,故活载效应减小。与工况1相比,主梁各跨的跨中向上挠度增大,而各桥塔根部处挠度减小,主梁桥塔根部处截面最大压应力略有增大,斜拉索拉应力略有降低。

### 3 结论

(1)由于塔高与跨径之比较大,斜拉索张力竖向分力增大,拉索承担荷载比例上升,主梁支点截面高度和内力得到有效降低。主梁的受力与变形主要表现为多跨连续梁的受力特点,主梁基本全截面受压,轴力分布较为均匀。较大的拉索张力导致主梁在桥塔根部支点处出现正弯矩,跨中出现负弯矩,且支点正弯矩起控制作用。主梁整体变形以向上为主,但变形较小,说明主梁刚度较大。

(2)在对称荷载下,主塔受力以受压为主,仅边塔略有侧倾,其余塔基本不发生变形。在非对称活载下,主梁受力表现为偏心受压,各塔均出现不同程度的侧倾,边塔塔顶位移最大,为29 mm。以上说明虽然主塔相对较高,各主塔无边锚索固定,但是由于主梁刚度较大,承担活载比例较大,主塔承担活载比例相应较小,且只起到拉索转向块的作用,故主塔沿桥梁纵向受力较小,各塔顶的纵桥向变形较小,故在中等跨径范围内,可采用多跨矮塔斜拉桥方案解决普通多跨斜拉桥的刚度问题。

(3)3种工况下每根塔柱两侧拉索拉力由内向外依次小幅增大,总体分布均匀,边跨索索力最大,活载作用引起的拉索应力增幅较小,说明该桥恒载索力比重较大。

(4)该多跨桥梁结构在非对称活载(工况3)下主梁、主塔、桥墩的内力与变形较大,结构受力最为不利。主梁第2跨跨中位移与支座截面应力,1#主塔与1#桥墩塔顶、墩顶位移与根部压应力、7#塔边跨侧最外侧拉索与桥塔锚固点处拉应力、在设计中应做为各构件控制截面和应力控制点。通过计算分析,各构件控制截面应力及变形均在桥梁设计规范规定范围内,且具有足够的安全储备,桥梁结构受力合理。

### 参考文献:

- [1] 郑一峰,黄侨,张宏伟.部分斜拉桥的概念设计[J].公路交通科技,2005,22(7):85-89.

- [2] 陈亨锦,王凯,李承根. 浅谈部分斜拉桥[J]. 桥梁建设,2002(1):44-47.
- [3] 臧华,刘钊. 部分斜拉桥的应用与发展[J]. 中国市政工程,2004(3):29-31.
- [4] 刘凤奎,蔺鹏臻,陈权,刘世忠. 矮塔斜拉桥特征参数分析[J]. 工程力学,2004,21(2):199-203.
- [5] 何新平. 矮塔斜拉桥的设计[J]. 公路交通科技,2004,21(4):66-68.
- [6] 谷定宇. 矮塔斜拉桥施工控制仿真分析[D]. 郑州:郑州大学土木工程学院,2006.
- [7] 史福明. 开封黄河公路二桥桥型方案研究[J]. 河南科学,2004,22(4):542-546.
- [8] 陈虎成,石雪飞. 部分斜拉桥结构性能研究[J]. 结构工程师,2004(3):27-31.
- [9] 陈从春,周海智,肖汝诚. 矮塔斜拉桥研究新进展[J]. 世界桥梁,2006(1):70-73,80.
- [10] 康伟. 小西湖黄河大桥部分斜拉桥结构分析[J]. 铁道标准设计,2004(11):88-90.
- [11] 李晓莉,肖汝诚. 矮塔斜拉桥的力学行为分析和设计实践[J]. 结构工程师,2005,21(4):7-9,22.

## Mechanics Properties Analysis for Continuous Multi-span Low Pylon Cable-stayed Bridge

WANG Yan<sup>1</sup>, GU Ding-yu<sup>1,2</sup>, CHEN Huai<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Xuhui Architecture Engineering Design LTD. , China)

**Abstract:** The 2nd Yellow River bridge in Kaifeng is a double plane prestressed concrete cable-stayed bridge with 7 low pylons and 8 spans. The bridge was taken as the object of study and mechanics properties analysis of it had been made by adopting finite element program Midas/civil. The results indicate that stay cables undertake more vertical loads because of the bigger ratio between height of king pylons and spans of girder, so the height and internal force of the girder sections at supporting points can be decreased effectively; the internal forces and deformations of the girder display an characteristic as well as multi-span continuous beams, the whole sections of girder are all under compressive stress basically, axis force distribution is uniform, the positive bending moment appears at the supporting points of girder and it is larger than the hogging moment at the mid-spans; the stiffness of girder is large, because the deformation of girder gives priority to the smaller upwards vertical deformation; the king pylons only serve as a steering column for stay cables and force in longitudinal direction is smaller, the displacements at the top of pylons in the longitudinal direction of bridge is so small that in scale of medium spans, the scheme of low pylons cable-stayed bridge can solve the problem of stiffness of multi-span cable-stayed bridge; The tension forces of cables at both sides of each pylon increase gradually from inside to outside, the force of cables of side-span is largest, and the growth of cables stress under live loads is very small; the bridge under asymmetric loads is disadvantageous, the stress and deformation of control section of each members are all in the range of the standard of criterion and have great safety storage, the structure of bridge is reasonable under loads.

**Key words:** multi-span low pylon cable-stayed bridge; finite element method; mechanical properties