

# 偏载作用下塔梁固结中央索面斜拉桥倾覆扭转分析

袁堂涛, 贾 猛, 谭立振

(长安大学公路学院, 西安 710064)

**摘 要:**现代城市桥梁建设中,对桥梁美学的追求越来越重要,中央索面斜拉桥凭借其独特的空间造型而被广泛采用。由于塔梁固结、塔墩分离结构体系的中央索面斜拉桥结构空间单索面不能显著提高结构的整体抗扭刚度,所以在设计过程中需着重分析这种体系的抗扭、抗倾覆性能。以实际工程为背景,利用通用软件 Midas/civil 建立有限元模型,分析塔梁固结、塔墩分离中央索面斜拉桥在最不利偏载效应下的结构受力行为,提取关键截面处的应力和位移数据对结构的主梁抗扭、抗倾覆性能进行比较分析,并且对影响此种结构体系斜拉桥抗扭因素的敏感参数进行了着重分析。

**关键词:**中央索面斜拉桥;塔梁固结;偏载作用;倾覆扭转;Midas/Civil;敏感参数分析

**中图分类号:**U448.27

**文献标志码:**A

## 引 言

塔梁固结体系的单索面斜拉桥<sup>[1-3]</sup>由于其独特的审美效果在城市桥梁建设中被广泛采用,单索面斜拉桥的斜拉索一般锚固于主梁中心横隔板与中腹板相交处,其单索面的斜拉索无法提供较强的空间抗扭刚度<sup>[4]</sup>,所以在较大的偏载作用下主梁的抗扭效应<sup>[5-7]</sup>需认真分析,确保结构安全性。对于此种结构体系,首先,采用的是箱梁截面,箱型截面可以提供较大抗扭刚度,受力性能好,并且桥型简洁美观,因此在桥梁设计时经常被采用;其次,对于塔梁固结体系的单索面斜拉桥的支座设计也是增加其抗扭、抗倾覆性能<sup>[8-10]</sup>的重要方法。作用在结构上的荷载分为恒荷载和活荷载,恒荷载一般是对称荷载,而活荷载则存在对称和非对称两种情况,特别是现在的交通量有日益增加的趋势,对于活载的偏载<sup>[11]</sup>需要着重注意。

## 1 工程背景及有限元模型的建立

### 1.1 工程背景

工程是主桥为双塔中央索面的塔梁固结、塔墩分离的预应力混凝土斜拉桥,主桥全长 340 m,桥梁跨径布置

为 80 m + 180 m + 80 m,桥面宽度为 26.5 m,横桥向坡度为 2%,主梁截面采用的是闭口预应力等截面连续箱梁,采用 C50 混凝土,截面形式是单箱三室,主梁的高度为 2.65 m。主塔采用 C50 混凝土,采用变截面形式,中央单柱式结构形式。桥梁的斜拉索是中央双索面形式,每个塔柱左右共 12 对,斜拉索采用扇面形式布置,斜拉桥锚固点横桥向间距为 80 cm,跨中纵桥向间距为 7.1 m,边跨 8~11#斜拉索纵向间距为 4.7 m,其他斜拉索纵向间距为 7.1 m。桥梁的约束体系为:桥塔主墩处横桥向设置 4 个支座,中间两个支座是 7000 t 的球型钢支座,两侧支座为 2500 t 的球型钢支座,共用墩设置 500 t 球型钢支座。公路等级为一级。斜拉桥立面图布置如图 1 所示,主梁标准断面如图 2 所示。

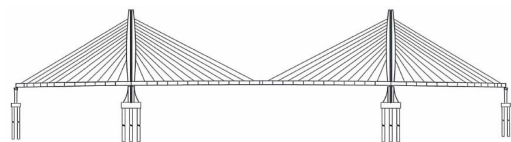


图 1 立面图布置

### 1.2 有限元模型的建立

随着计算机水平的发展,在满足工程实际的要求下

收稿日期:2016-6-07

作者简介:袁堂涛(1989-),男,山东临沂人,硕士生,主要从事桥梁结构理论方面的研究,(E-mail) yuantangtao@126.com

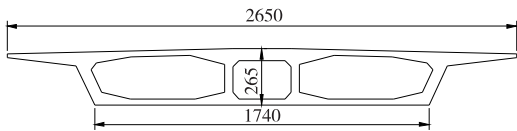


图 2 主梁标准断面图(单位:cm)

运用计算机有限元程序分析计算桥梁结构的受力越来越普遍,能获得全面而精确的分析结果,也能避免理论计算冗长的过程。本文运用 Midas/civil 桥梁结构有限元分析软件建立全桥模型,对于结构模型建立过程中的要点在于对主梁混凝土箱梁的模拟,对于箱梁的模拟,主要采用单梁模型、梁格法、板壳单元以及实体单元,分析主梁在偏载作用下的扭转效应<sup>[12-13]</sup>是箱梁结构的空

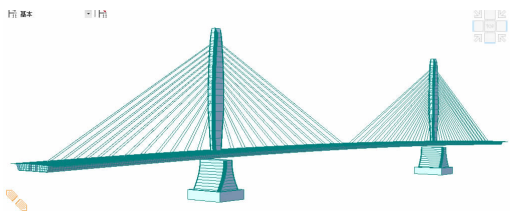


图 3 有限元整体模型

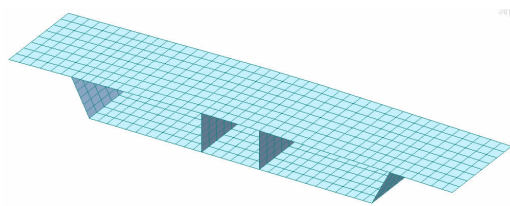


图 4 主梁壳单元划分

### 1.3 荷载布置

成桥状态下的偏载效应主要来自于汽车荷载。对于荷载的分布,分别取以下三种工况进行模拟。

工况一:采用不对称布置,单侧双车道布载,偏载最不利布载(图 5)。

工况二:采用对称布置,双向双车道布载,中载布载(图 6)。

工况三:采用对称布置,双向四车道,中载最不利布载(图 7)。

图 7 中载最不利布载由于有限元分析结果数据庞大,所以只提取关键位置截面处的相关数据进行对比分析,在不同工况情况下,选择中跨跨中主梁截面和边跨

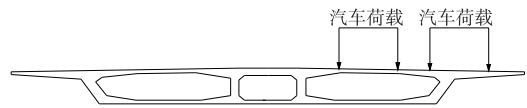


图 5 偏载最不利布载

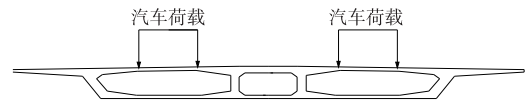


图 6 中载双车道布载

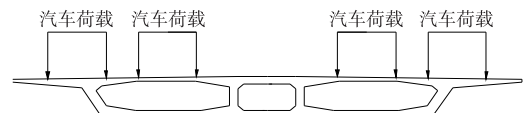


图 7 中载最不利布载

跨中主梁截面的位移和应力结果进行分析,主要比较结构在不同活载工况效应的抗倾覆、抗扭转性能。

## 2 计算结果和分析

### 2.1 主梁顶面的竖向位移

对于梁的位移主要是分析在荷载作用下梁的扭转程度,即主梁的顶面不同测点的挠度值,然后对比整个主梁的倾斜角。在主梁顶面选择 28 个位移提取点。中跨主梁顶面竖向位移如图 8 所示,边跨主梁顶面竖向位移如图 9 所示。

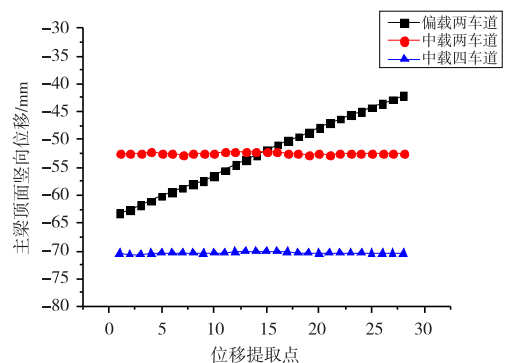


图 8 中跨截面竖向位移

由图 8、图 9 可知:对称布置的活载对于结构边跨和中跨的主梁位移效应趋势是一致的。在非对称活载作用下,结构边跨和中跨的主梁顶面的竖向位移横桥向有了显著的变化,可以算出两跨跨中截面的扭转角,中跨为  $7 \times 10^{-4}$  rad,边跨为  $2 \times 10^{-4}$  rad。

通过模型提取主梁顶面的竖向变化位移,计算主梁关键截面在荷载作用下的最大扭转角,现有的桥梁标准规范对桥梁的横向扭转刚度并没有明确说明,借鉴以前诸多工程单索面斜拉桥设计的不成文经验,通过模型提取主梁顶面的竖向变化位移,计算主梁关键截面在荷载

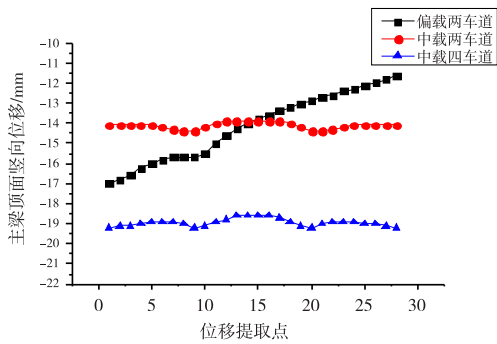


图9 边跨截面竖向位移

作用下的最大扭转角,若扭转角小于桥梁横桥向的坡度而不反坡,则认为结构满足抗扭刚度的要求<sup>[16-17]</sup>。由于最大扭转角为  $7 \times 10^{-4}$  rad,远小于桥梁横坡 2%,因此该桥扭转角满足使用要求,抗扭刚度满足要求。

## 2.2 主梁顶面的应力

提取关键截面主梁顶面的应力值,中跨主梁顶面竖向位移如图 10 所示。

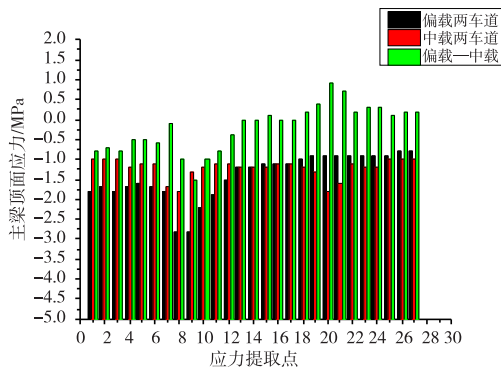


图10 中跨跨中截面

由图 10 数据分析可知:偏载非对称作用下主梁顶板的应力值比中载对称作用下的应力值最高处大约 53%,边跨跨中的主梁截面在不同工况作用下的受力特点和中跨大致相同,应力最大变化值出现在偏载作用下,所以在偏载布置作用下,主梁的畸变应力比较明显。

在设计中需要采取相关措施增加结构的抗扭刚度,跨径的大小是影响主梁抗扭刚度的因素之一。随着跨径的增加,预应力混凝土材料的箱梁恒载所占的结构重量的比例会增加,活载的作用效应相较于恒荷载的作用就会相应变小,由此可知,在大跨斜拉桥设计中活载偏载的作用并不是影响箱梁截面设计的主要因素。

## 2.3 主梁底面的应力

提取底面数据分析(图 11)。

中跨主梁底板的应力在中载作用下除个别应力集中外,其他都比较平均。由数据分析可知作用两车道的荷载效应都明显小于最不利中载四车道荷载的效应。

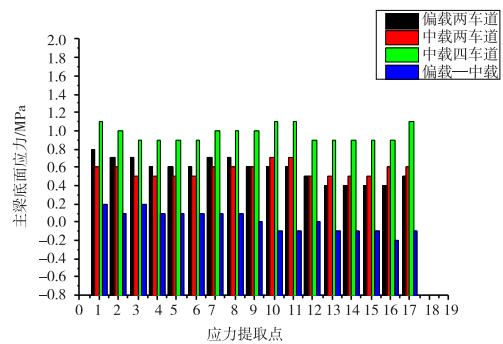


图11 中跨跨中截面

边跨主梁底板在两车道的荷载效应也同样明显小于四车道荷载的效应。

上述分析结果中最不利偏载作用效应都小于最不利中载作用效应,说明偏载效应并不是截面设计的控制因素,在实际设计过程中,还是以最大活载对称布置为主要因素。

## 3 偏载作用下的敏感参数分析

以成桥状态为分析对象,在活载作用下,对桥梁结构的偏载敏感参数<sup>[16]</sup>进行分析,以确保结构合理的受力状态,分别对桥梁结构的一些设计参数进行了分析对比,由于边跨和中跨的变化趋势一致,限于篇幅,仅取中跨的关键截面予以研究。

### 3.1 支座的横向间距

保持其他参数不变,将支座的横向距离进行改变,具体如下:分别将外支座向外扩大 1 m 和向内缩减 1 m,对比在活载偏载作用下结构的受力情况,由于是塔墩分离、塔梁固结结构,支座竖向受力行为相同,故只选取一个墩的四个支座反力分析,数据见表 1 和图 12、图 13。

表1 不同支座距离下的支座反力

	1#支座 /(F <sub>z</sub> /kN)	2#支座 /(F <sub>z</sub> /kN)	3#支座 /(F <sub>z</sub> /kN)	4#支座 /(F <sub>z</sub> /kN)
增加 1 m	106.9	995.7	1956.3	3609.7
原距离	64.7	848.9	2103.3	3909.0
减小 1 m	23.6	670.1	2331.6	4289.4

由数据分析可知:对于塔梁固结、塔墩分离结构体系的斜拉桥,可以看成有大量体外预应力加强的连续梁,所以在偏载作用下,支座的间距对其有明显的影,支座横向间距的增大,使得支座反力有趋于均匀分布的趋势,支座受力更加合理,提高耐久性;并且使得主梁关键截面的扭转角相对减小,在结构受到偏载作用时,结构的抗倾覆力臂增大,能明显增加结构的抗扭转能力。

### 3.2 中央双索面的间距

保持其他参数不变,将索面间距增加 50 cm 和 100 cm,

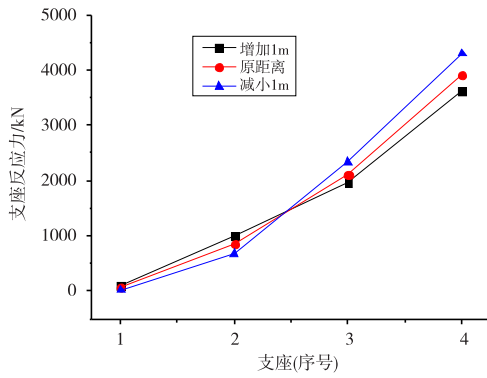


图 12 支座反力数据对比

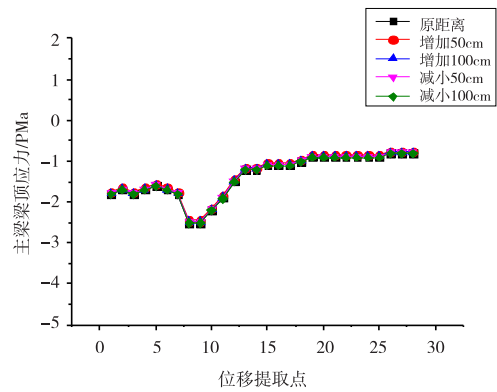


图 15 中跨跨中截面应力比较

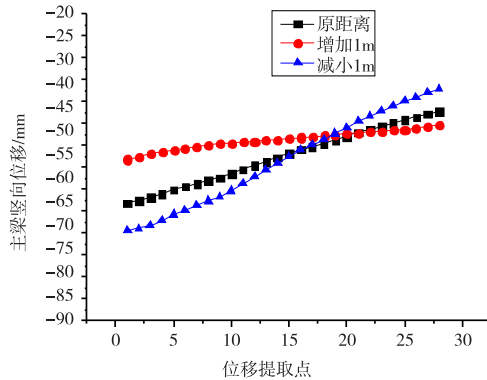


图 13 主梁截面竖向位移

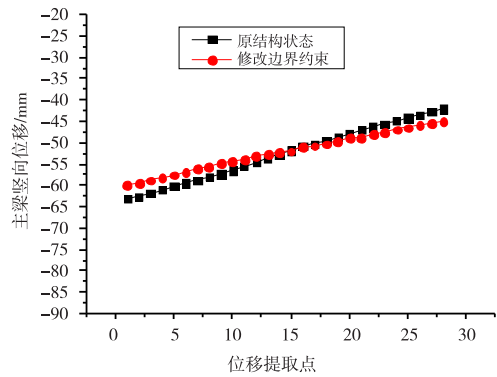


图 16 主梁截面竖向位移

针对双索面之间的间距进行分析对比,比较主梁关键截面在偏载作用下的竖向位移以及应力大小。由于数据较多,只选择中跨跨中截面进行分析。如图 14、图 15 所示。

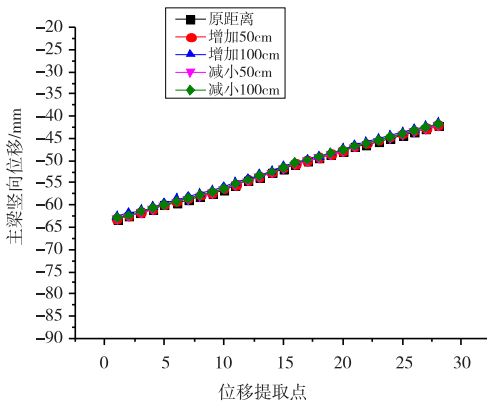


图 14 中跨跨中截面位移比较

由数据分析知:中央双索面索面距离的变化并不能显著改变斜拉桥的空间抗扭效应,在设计中不是主控因素,所以可以根据实际情况进行改变调整,但是为了桥面的行车舒适度和环境美观性应合理布置索的间距。

### 3.3 结构边界的约束

保持其他参数不变,将桥梁结构的边界约束予以如下改变:原结构是塔梁固结,塔墩分离,现改变一个桥塔

为塔墩梁固结,而另一个塔保持原状态,对比在活载偏载作用下结构的受力情况,分析结果如图 16 所示。

由图 16 分析可知:桥梁结构的边界约束改变后,在偏心荷载作用下,中跨跨中截面的主梁横桥向的竖向位移在两种状态下有稍微的变化,但是变化量很小,即关键截面主梁的扭转角变化并不明显,说明在偏载活载作用时,边界约束的改变并不是控制结构设计的关键因素。考虑温度效应的影响,以及整体刚度的影响,若为两塔结构,一个塔墩梁固结,另一个设置活动支座,更为有利。

## 4 结论

(1)对中央索面的预应力闭口箱梁斜拉桥的抗倾覆、抗扭转分析,提出主梁用壳单元模拟是一种合理的计算方法,满足工程精度要求。并且结合实际工程分析了桥梁结构在偏载作用下的抗倾覆、抗扭转性能。

(2)对于在不同偏载工况作用下,选取边跨和中跨的关键截面进行分析可知:在偏载作用下结构出现了偏转,但是由于主梁截面是闭口截面,可以显著提高箱梁的抗扭能力。偏载效应并不是截面设计的控制因素,在实际设计过程中,还是以最不利活载对称布置为主要因素。

(3)提出通过分析主梁在最不利偏载作用下的扭转

角大小来判断结构的抗倾覆性能,分析可知:成桥状态结构在最不利工况下的扭转角的大小满足不大于桥面设置的横坡坡度,即可满足结构的抗倾覆性能。

(4)着重分析了偏载作用下抗倾覆、抗扭转的敏感参数:改变中央双索面斜拉桥索间距并不能显著改变结构的扭转效应;对于塔梁固结、塔墩分离体系的斜拉桥,支座在抗倾覆方面起着关键作用,支座的横向间距的变化对桥梁结构有着显著的影响,增加了结构的抗倾覆能力,以及使得支座受力更加均匀,对于结构的耐久性有着很大的提高;对于双塔单索面桥梁结构边界约束的改变并不是结构提高抗扭性能的关键,但合理布置塔墩梁的约束形式会使得结构受力更加合理。还应考虑温度对结构的应力效应,使结构受力更加合理。

(5)由于塔梁固结、塔墩分离中央双索面斜拉桥独特的结构体系特点,结构的抗倾覆、抗扭转是整体稳定的关键因素,所以在设计和施工过程中需要着重注意。

#### 参考文献:

- [1] 林元培.斜拉桥[M].北京:人民交通出版社,1994.
- [2] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,1996.
- [3] 项海帆.高等桥梁结构理论[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [4] 徐勋.大跨度混凝土箱梁结构空间效应研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- [5] 周铮,孙振海,张黎明,等.双箱单室波形钢腹板预应力组合梁桥偏载效应分析[J].中外公路,2015,35(3):

117-119.

- [6] 狄谨,周绪红,游金兰,等.波纹钢腹板预应力混凝土组合箱梁抗扭性能[J].长安大学学报,2009,27(3):58-63.
- [7] 刘琪.独塔单索面混合梁斜拉桥偏载扭转效应分析[J].桥梁建设,2011(3):42-45.
- [8] 彭卫兵,徐文涛,陈光军,等.独柱墩梁桥抗倾覆承载力计算方法[J].中国公路学报,2015,27(3):66-72.
- [9] 万世成,黄侨.独柱墩连续梁桥偏载下的抗倾覆稳定性研究综述[J].中外公路,2015,35(4):166-171.
- [10] 王文龙.混凝土箱梁桥抗倾覆性能与增强措施研究[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [11] 卢波,戴廷利,彭玫.桥梁偏荷载的箱形梁效应分析[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2008,27(增刊):852-854.
- [12] 陈智俊.独塔单索面斜拉桥主梁扭转性能研究[D].武汉:华中科技大学,2006.
- [13] 牛祥恒.单索面钢箱梁斜拉桥的抗扭性能研究[D].西安:长安大学,2014.
- [14] 庄庆泰.连续钢箱梁桥整体稳定及抗倾覆性能研究[D].西安:长安大学,2013.
- [15] 方志,张国刚,唐盛华,等.混凝土斜拉桥动力有限元建模与模型修正[J].中国公路学报,2013,26(3):81-89.
- [16] 刘冠华.单索面宽体斜拉桥抗倾覆性能研究[D].西安:长安大学,2015.
- [17] 许伟龙.预应力混凝土宽箱梁单索面斜拉桥抗扭性能研究[D].杭州:浙江工业大学,2013.

## Analysis of Overturning and Torsion of Cable Stayed Bridge with Central Cable Plane Under Partial Load

YUAN Tangtao, JIA Meng, TAN Lizhen

(School of Highway, Key Laboratory of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In the modern urban bridge construction, the pursuit of bridge aesthetics is more and more important. The central cable plane cable stayed bridge has been widely used by virtue of its unique spatial form. Because the single cable plane of the cable plane cable stayed bridge with tower-beam consolidation can not significantly improve the overall torsional rigidity of the structure, it is necessary to analyze the anti-torsion performance of the system in the design process. The finite element model is established by using the general software Midas/civil. The structural stress analysis of the cable stayed bridge under the most disadvantageous load is analyzed. The stress and displacement data of the key section are extracted, and the structure of the main beam is compared and analyzed. It is found that the partial load effect is not the key factor in the design of the control section. And a brief analysis is made on the sensitive parameters affecting the torsion resistance of the cable stayed bridge of this kind of structure system.

**Key words:** central cable plane cable-stayed bridge; tower-beam consolidation; eccentric loadings; torsion effect; Midas/civil; sensitive parameter analysis