

# 特大跨径三塔两跨悬索桥的位移特性初探

陈 策, 殷海华

(江苏省长江公路大桥建设指挥部, 江苏泰州 225321)

[摘要] 泰州大桥采用三塔两跨悬索桥方案,以泰州大桥工程为例,分析了三塔悬索桥与双塔悬索桥位移特征的不同点,并研究分析了塔的刚度、高度、主梁高度、矢跨比变化、边中跨比变化对三塔悬索桥位移特征的影响。

[关键词] 三塔悬索桥;泰州大桥;位移特征;影响参数

[中图分类号] U448.25 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)08-0079-04

## 1 前言

泰州大桥是交通部印发的《长江三角洲地区现代化公路水路交通规划纲要》所规划的长江三角洲高速公路网和江苏省规划“五纵九横四联”高速公路网的组成部分,也是江苏省规划建设11座公路过江通道之一。项目处于长江江苏段的中部,直接连接着北京至上海、上海至西安和上海至成都的3条国家高速公路,在长江三角洲地区和江苏省的高速公路网中起着重要的联络和辅助作用。

经过5年的基础性前期研究,泰州大桥选择了永安洲北桥位,江面宽2.3 km,河床呈W型,桥位区河床中部相当宽范围河床面高程在-15~16 m之间,深泓在右侧、最深处河床高程-30 m。为了更好地利用航道资源,减少水中墩和锚碇结构物的数量,降低船舶撞击桥梁的概率,同时为两岸不可再生的岸线资源提供长远的发展空间,泰州大桥创新设计了三塔两跨式悬索桥型,以更好地适应桥位处水文形势的复杂变化。

## 2 泰州大桥方案简介

主缆跨径布置为 $(390+2\times 1\,080+390)$  m。主梁梁高3.5 m,全宽39.10 m,标准节段长16 m。

中、边塔塔顶标高分别为200.0 m和180.0 m,边塔采用混凝土塔柱,中塔采用纵向人字型钢塔(见图1)。为提高主缆与中主鞍座间抗滑移安全系数、改善中塔受力、减小加劲梁纵向活载位移,中塔处设置了纵向弹性索约束,弹性索一端固定在加劲梁,另一端固定在中塔<sup>[1]</sup>。由于弹性索的作用,加劲梁产生顺桥向轴力,为了传递该顺桥向轴力,同时增强悬索桥正交异性桥面板的刚度,设置了全桥通长的直腹板构造。两根主缆横向中心距为34.8 m,主缆矢跨比采用1/9。每根主缆由154股索股组成,每根索股由91根直径为5.2 mm的镀锌高强钢丝组成,钢丝极限抗拉强度为1 670 MPa。

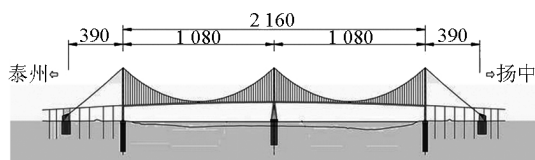


图1 泰州大桥总体布置图(单位:m)  
Fig. 1 Overall layout of Taizhou Yangtze River Bridge (unit:m)

## 3 三塔悬索桥与双塔悬索桥的区别

首先研究了三塔悬索桥与双塔悬索桥两者位移特征的区别,以泰州大桥三塔悬索桥方案的设计原

[收稿日期] 2010-01-05

[基金项目] 国家科技支撑计划资助项目(2009BAG15B01)

[作者简介] 陈 策(1975-),男,江苏盐城市人,高级工程师,研究方向为桥梁工程;E-mail:cc808cc@163.com

型建立两塔和三塔悬索桥计算模型。两塔悬索桥计算模型的分跨布置为(390 + 1 080 + 390) m。三塔悬索桥计算模型的分跨布置为(390 + 2 × 1 080 + 390) m,中塔横梁与主梁间设横向抗风支座,下横梁上不设竖向支座,其余结构参数与两塔悬索桥计算模型相同。建立有限元计算模型时,加劲梁和桥塔采用 beam4 单元模拟,主缆和吊杆采用 link10 单元模拟,吊杆和加劲梁通过刚臂连接形成“鱼骨式”力学计算模型。未记入基础、承台以及锚碇的影响,塔底和边缆锚固端约束所有自由度,得到两塔悬索桥和多塔悬索桥的有限元计算模型如图 2 所示。

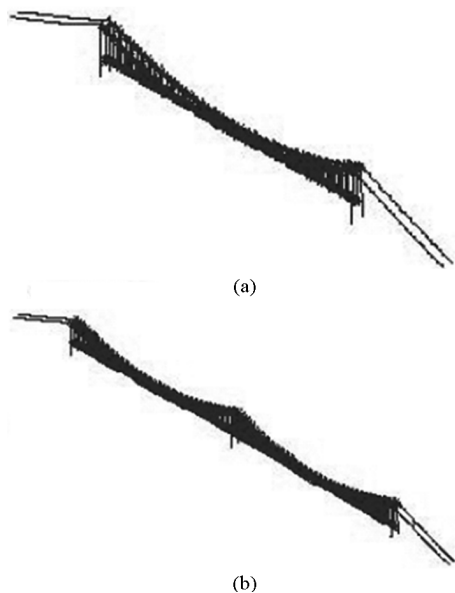


图 2 两塔和三塔悬索桥有限元计算模型

Fig. 2 Finite element model of two - tower and three - tower suspension bridge

根据《公路桥涵设计通用规范 (JTG D60 - 2004)》<sup>[2]</sup>的规定,公路 - I 级车道荷载的均布荷载标准值为  $q_k = 10.5 \text{ kN/m}$ ;集中荷载标准值按桥梁计算跨径等于或大于 50 m 时,取  $P_k = 360 \text{ kN}$ 。由汽车荷载产生的效应按规范中规定的多车道折减系数进行折减,取横向折减系数为 0.55,同时对于大跨径桥梁上的汽车荷载考虑纵向折减,取纵向折减系数为 0.93。在汽车荷载作用下,两塔与三塔的有限元静力分析结果见表 1。

表 1 两塔悬索桥与三塔悬索桥位移特征分析

Table 1 Displacement characteristics of two - tower and three - tower suspension bridge

	边塔最大位移	中塔顶最大位移	主梁最大竖向挠度
两塔悬索桥	0.153		2.55
三塔悬索桥	0.138	1.68	3.75

由表 1 可知,三塔悬索桥的边塔顶水平位移与两塔悬索桥基本相当,但其中塔顶水平位移比两塔悬索桥的塔顶位移要大得多,约为两塔悬索桥塔顶水平位移的 10 余倍,其主要原因是中塔顶缺乏有效的纵向约束,从而导致在竖向活载作用下塔顶产生很大的水平位移。与两塔悬索桥相比,三塔悬索桥的主梁竖向挠度显著增大,其主梁的最大竖向挠度约为两塔悬索桥的 1.5 倍,究其原因,是因为两塔悬索桥在活载作用下,两个桥塔顶部产生的水平位移非常小,主梁产生竖向变形主要是由于主缆的形状发生了改变;而三塔悬索桥在活载作用下,中塔顶较大的纵向位移加大了主梁的最大竖向挠度。分析表明,主跨 2 × 1 080 m 的三塔悬索桥活载作用下主梁的最大竖向挠度接近于跨径约为 1 400 ~ 1 500 m 悬索桥的水平<sup>[3]</sup>。

#### 4 对三塔悬索桥位移特征影响的参数研究

采用非线性有限元对各研究项目选用不同的参数,各自建立有限元计算模型进行计算,这些模型除指定的比较项目变化,其他参数均相同。有限元模型中,主缆和吊索离散为具有初始轴力的空间缆索单元,加劲梁和桥塔离散为空间梁单元,主塔底和主缆锚固处采用固结约束,加劲梁和桥塔下横梁采用主从约束,边塔及中塔处皆采用主从竖向、横向和扭转 3 个自由度。

##### 4.1 塔刚度的影响

泰州大桥中塔采用纵向人字型钢塔,塔柱纵向从下到上共分为 3 个区段,下端斜腿段、交点附近的曲线过渡段及上端直线段。直线段与斜腿段按圆曲线过渡,曲线半径为 100 m,其中曲线过渡段的高度约为 22.587 m。索塔横向为门式框架结构。

随着中塔刚度的增加(见表2),主梁的最大挠度以及中塔顶的最大位移逐步减小,但减小的幅度越来越小,另外考虑到用钢量随着刚度的增大而不断增加,综合考虑工程的造价及安全,中塔的刚度不宜过大。泰州大桥的边塔采用混凝土塔,由于边塔受两边拉索的纵向约束较大,边塔刚度系数改变时,对位移特征几乎没有影响。

表2 位移随中塔及边塔刚度的变化

Table 2 Displacement changes with the stiffness of middle tower and side tower

刚度系数	中塔刚度变化引起的位移变化		边塔刚度变化引起的位移变化	
	主梁最大	中塔顶最大	主梁最大	中塔顶最大
	挠度	位移	挠度	位移
0.55	5.297	2.274	4.507	1.739
0.75	4.882	1.995	4.508	1.739
1	4.505	1.740	4.505	1.740
1.25	4.229	1.549	4.503	1.740
1.45	4.057	1.428	4.501	1.740

## 4.2 塔高度的影响

为比较塔高对三塔悬索桥对位移的影响,在三塔等高的基础上将中塔塔顶升高,主跨主缆理论交点以跨中为中心旋转,保持主梁高程不变,矢跨比不变,结构截面尺寸不变,加高或降低区段按截面变化规律内插。

由图3可见,随着中塔的升高,主梁的最大挠度和中塔顶的最大位移增加,且两者皆接近线性关系。当中塔升高32m时,加劲梁的最大挠度增加了28%,中塔顶最大位移增加了50%。

同时研究了降低边塔高度的情况,结果表明,当边塔降低32m时,加劲梁的最大挠度几乎没有变化,中塔顶最大位移增加了1.7%。

由于中塔为钢塔,增加钢塔的高度,引起了结构明显的位移变化,而适当降低边塔的高度,对结构变形的影响很小,同时可以降低边塔的建设时间与成本,并减小了吊杆的长度,从而节省工程造价。

Table 3 Displacement changes caused by span ratio change

矢跨比	1/7	1/8	1/9	1/10	1/11	1/12	1/13
主梁最大挠度/m	4.073	4.280	4.505	4.750	5.022	5.278	5.497
中塔顶最大位移/m	1.665	1.724	1.740	1.721	1.685	1.626	1.548

## 5 结语

1) 相同主跨条件下,三塔悬索桥的边塔顶水平

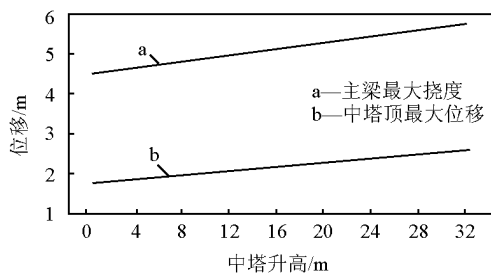


图3 中塔升高引起的位移变化

Fig. 3 Displacement changes caused by elevating middle tower

## 4.3 加劲梁高度的影响

当主梁截面高度由2.5m增加到5m时,加劲梁最大挠度减小了3.8%,中塔顶最大纵向位移减小了1.3%,可见主梁高度增加对位移的影响很小,但却会引起工程造价的增加。

## 4.4 矢跨比的影响

矢跨比是影响三塔悬索桥位移特征的重要参数之一,研究了7种不同的矢跨比(见表3)。当矢跨比较大时,主梁的最大活载挠度较小,主缆的用钢量、塔和锚碇基础的规模都相对较小<sup>[4]</sup>,当矢跨比由1/7减小至1/13时,主梁最大竖向活载挠度增大了35%,且两者接近线性关系;而中塔顶最大纵向位移先变大后变小,中塔纵向位移最大值(矢跨比1/9)与最小值(矢跨比1/13)相差为11%。

## 4.5 边中跨比的影响

在已建的两塔悬索桥中,美国华盛顿桥的边中跨比最小为0.17,里斯本塔谷斯河桥的边中跨比最大为0.48<sup>[5]</sup>。图4列出边中跨比从0.2~0.45变化时,对三塔悬索桥位移特征的影响。结果表明,边中跨比由0.2变化至0.45时,主梁的最大活载竖向挠度增加了8.8%,中塔顶的最大纵向位移减小了7%,可见边中跨比对位移的影响不大。

表3 矢跨比对位移的影响

位移与两塔悬索桥基本相当,但中塔顶最大纵向水平位移比约为边塔顶最大水平位移的10余倍,三塔悬索桥的主梁最大竖向挠度约为两塔悬索桥的

1.5 倍。

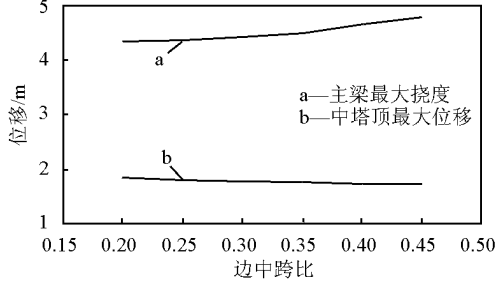


图4 边中跨比引起的位移变化

Fig. 4 Displacement changes caused by ratio change between side span and main span

2) 三塔悬索桥中塔刚度增加时,主梁的最大挠度以及中塔顶的最大位移逐步减小,边塔刚度系数改变时,对位移特征几乎没有影响。

3) 增加钢中塔的高度,引起了三塔悬索桥结构

明显的位移变化,而适当降低混凝土边塔的高度,对结构变形的影响很小,因此可以适当降低边塔高度以节省工期及造价。

4) 当矢跨比变小时,三塔悬索桥主梁最大竖向活载挠度增大,中塔顶最大纵向位移先变大后变小。

5) 主梁高度、边中跨比变化对三塔悬索桥结构位移的影响不大。

#### 参考文献

- [1] 江苏省长江公路大桥建设指挥部,泰州长江大桥设计项目组. 泰州长江大桥三塔悬索桥结构分析研究[R]. 2006
- [2] JTG D60-2004. 公路桥涵设计通用规范[S].
- [3] 中交公路规划设计院有限公司. 泰州长江公路大桥跨江大桥工程初步设计咨询审查总体分析报告[R]. 2007
- [4] 陈策,钟建驰. 三塔悬索桥垂跨比变化对结构静动力特性的影响[J]. 桥梁建设, 2008, (6): 12-14
- [5] 朱本瑾. 多塔悬索桥的结构体系研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007

## Displacement characteristics of long span three-tower suspension bridge

Chen Ce, Yin Haihua

(Jiangsu Provincial Yangtze River Highway Bridge Construction Commanding Department, Taizhou, Jiangsu 225321, China)

[Abstract] Taizhou Yangtze Highway Bridge adopts three-tower suspension bridge scheme which has two 1 080 m main span in its primary design. This paper studies the different displacement traits between three-tower suspension bridge and two-tower suspension bridge. It also analyzes the influence of various parameters, such as the rigidity and height of the tower, the height of the main girder, the sag-to-span ratio and side span's length to middle span's ratio, on displacement feature of three-tower suspension bridge.

[Key words] three-tower suspension bridge; Taizhou Bridge; displacement characteristics; influencing parameters