

天津富民桥主缆设计与计算

周泳涛, 李毅谦, 涂金平, 贾界峰

(路桥集团桥梁技术有限公司 北京市 100102)

摘 要: 以天津富民桥为例, 根据空间索面自锚式悬索桥的主缆受力特点进行计算和分析, 验证和分析了计算方法的可靠性。通过该桥空间主缆的设计和计算, 为今后我国空间索自锚式悬索桥的建设进行了有益的探索, 也积累了不少有益的经验。

关键词: 悬索桥; 空间索面自锚式悬索桥主缆; 主缆受力特点; 设计和计算方法

国内外自锚式悬索桥建成和在建的至今为止已有 20 余座, 空间索面的自锚式悬索桥设计和修建的还不多。自锚式悬索桥在 21 世纪初, 登上了中国桥梁舞台, 立即受到设计者、评审者、决策者的青睐, 在短短 5 年中建成或在建的有 10 余座之多, 成为城市桥梁的主打桥型。空间索面悬索桥的自锚和空间索面这两个受力特点, 使得主缆的受力较为复杂。主缆作为悬索桥的主要承重构造, 其设计的合理性直接关系到整座桥梁设计的合理性、安全性、经济指标和美观方面的要求, 所以主缆的构造和受力特点需要进行认真的分析和研究。

悬索桥是一种传统的桥梁结构形式, 因悬索桥的跨径一般很大, 加劲梁的刚度在全桥刚度中所占的比例很小, 也就是说为了减少在外荷载作用下加劲梁产生的变形, 应该是提高主缆的刚度而不是加劲梁的刚度, 故在受力本质上悬索桥属于柔性索悬挂体系, 它在外荷载作用下将产生相对较大的变形。悬索桥的分析必须计入内力与结构变形的影响, 否则将引起较大的误差, 应采用有限位移理论对桥梁进行分析和计算。

1 工程概况

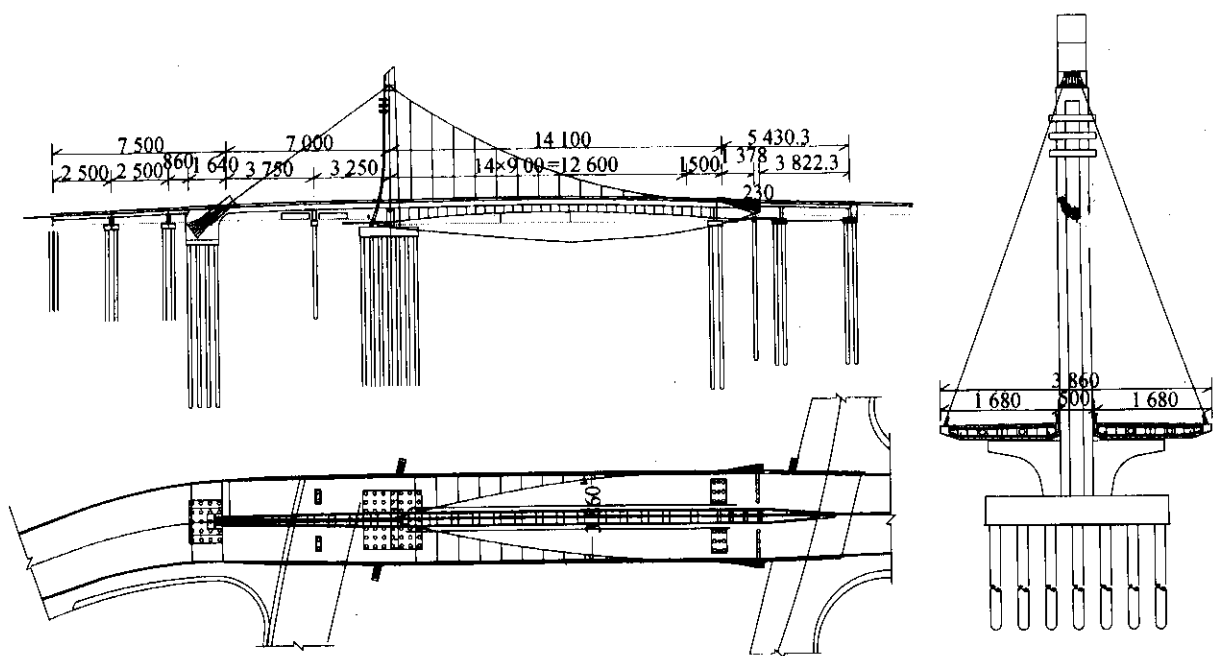
众所周知, 悬索桥由缆索、索塔、锚碇、加劲梁和吊杆等组成, 其中任何一个部分的设计都很重要, 而且一动百摇, 设计总是在不断地调整它们之间的组合关系后做出的。如何根据桥位处地形、地貌、地质条件使得悬索桥的这几个部分合理搭配, 做到受力

合理、传力途径清晰明了、选材适当、经济指标较低、外形美观, 设计出一座合理的悬索桥绝非易事。天津富民桥在经过工可、初步设计、施工图设计三个阶段的多方案比较后, 最终确定为独塔空间索面自锚式悬索桥。

桥梁孔跨布置为 19 m+20 m+19.6 m(引桥, 3 跨混凝土连续梁)+86.4 m+157.081 m(主桥, 单塔空间索面自锚式悬索桥)+38.219 m(引桥, 单侧悬臂混凝土框架结构), 桥梁全长为 340.3 m。主跨 157.081 m 一跨跨越海河, 边跨 86.4 m 跨越城市主干道。桥梁横向设置为双主梁结构, 中间用钢横撑联结, 桥梁全宽为 38.6 m。加劲梁采用正交异性板钢箱梁结构。为减少桥面宽度节省用钢量, 设计别具匠心地把 5 m 宽人行道悬挂于钢箱梁之下, 让游客更加贴近于自然, 观光海河风光。主缆在边跨端锚固于中央分隔带位置, 主跨端锚固于加劲梁两侧, 主缆和吊杆呈空间索面散开, 材料采用高强度平行钢丝。索鞍和索夹采用 35 号铸钢, 主塔、边跨锚碇、承台和桩基础采用钢筋混凝土结构。主跨主缆直接锚固于加劲梁端的预应力混凝土箱梁内, 梁下设钢板支座。由于边跨边缆角度较大, 为克服较大的上拔力, 边跨边缆锚固于边跨锚碇之内, 钢箱加劲梁在边跨端通过预应力混凝土过渡梁段与锚碇固结, 桥梁其余约束全部放开, 全桥变形由主跨自锚端伸缩装置完成。

2 主缆设计

至今为止, 国内外建成和在建的自锚式悬索桥



单位:cm

图1 桥梁总体布置

已有 20 余座,空间索面悬索桥约有 10 座,其中一半是人行桥,且跨径不大。除韩国永宗桥和美国奥克兰海湾新桥以外,其余桥梁横向矢跨比小,空间特性不强,所以空间主缆的设计和计算方法值得探讨。

地锚式悬索桥的理论研究已经日臻完善,并有大量的研究文献资料。交通部部颁《公路悬索桥设计规范》(报批稿),第九章专门叙述了主缆的设计和计算方法,但有关空间索面主缆的资料却不多见,由于主缆的空间结构,使得主缆受力较为复杂,本文以天津富民桥主缆设计为例,对空间索面自锚式悬索桥进行了探索,并积累一些有益的经验。

2.1 主缆

主缆由 2 跨组成。其跨径组成为 86.4 m + 157.081 m。主跨主缆理论跨径为 141 m,在设计成桥状态下,理论垂度为 52.46 m,垂跨比约为 1 : 5.376。设计时根据计算结果(单根主缆在各种荷载组合作用下 $\sigma_{\max} = 420 \text{ MPa}$)主缆设计为 37 股 127 丝 $\phi 5$ 平行钢丝。由于空间索面受力较为复杂,吊索为空间杆,每根吊索对主缆的拉力方向均不相同,主缆坐标由施工到成桥阶段线形为空间变化,会造成两吊索间主缆要承受一定的扭矩,这在以往的悬索桥中是没有的,在暂时没有实验数据的前提下,设计时主缆安全系数较保守地取为 4.0。主跨主缆锚固于主跨桥面系两端。边跨主缆直接锚固于 3 号重力式地

锚上。主缆断面和鞍座处主缆断面见图 2、图 3 所示。

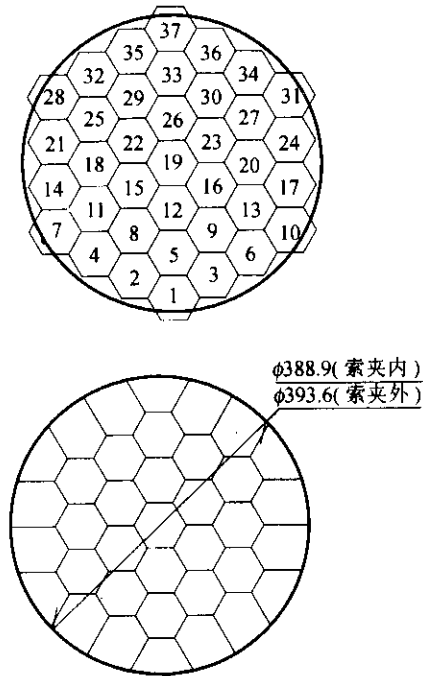
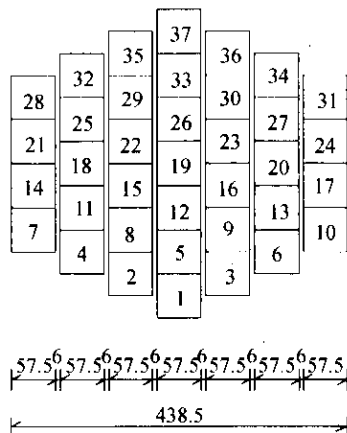


图2 主缆断面

2.2 吊索和索夹

吊索采用 91 丝 $\phi 5$ 平行钢丝成品吊索,吊索基本水平间距为 9.0 m,每个吊点 2 根吊索为一组,全桥设置吊索 28 组。考虑安全和换索需要,纵向设置双吊索,安全系数 $K = 4.1$ 。换索时保证有 2.0 的安全



单位:mm

图3 鞍座处主缆断面

系数。为了适应空间索面各方向转角以及施工时上下连接的方便,吊杆锚头设计为带球铰的冷铸锚。

2.3 主鞍

塔顶索鞍采用全铸的整体式索鞍,为肋传力结构形式。本桥鞍座主缆槽口曲面的纵向圆弧半径 $R=3.5\text{ m}$ 。主缆鞍长 4.8 m ,宽 4.2 m ,高 2.08 m ,索鞍重约 85.6 t 。鞍座下设置聚四氟乙烯板,便于主鞍在施工过程中通过塔顶预埋反力架进行顶推,调整施工中恒载产生的塔顶不平衡的水平力。成桥后,再将索鞍的地脚螺帽固定,并将鞍座与底下钢板焊接。设计时应用空间有限元软件对鞍座进行局部受力分析,应力均满足规范要求。

2.4 缆索封闭装置

为了加强主缆在靠近主鞍区域的防护,采取设置缆索封闭装置的模式,以满足主缆与空气隔绝并允许自由转动的要求。该封闭装置主要包括主鞍连接套筒、封闭索夹连接板、封闭索夹等构件。

2.5 散索套

本桥采用散索套构造,将主缆索股分散锚固于锚体。主跨散索套采用全铸的肋传力结构,散索套纵向圆弧半径 $R=4.0\text{ m}$,以利于索股发散锚固。散索鞍长 2.0 m ,宽 1.1 m ,高 $0.996\sim 1.098\text{ m}$,2个散索套重约 14.5 t 。边跨主缆自中间向两边散索,偏角较大,散索套采用2个分离式全铸的肋传力结构分别散索,再用铸钢件加劲板将2个散索套横向连接,克服主缆散索产生的横向分力。散索纵向圆弧半径 $R=7\text{ m}$,散索鞍长 2.3 m ,宽 2.67 m ,高 $1.11\sim 1.27\text{ m}$,2个散索套重约 16.6 t 。

3 计算方法

3.1 分析计算方法

正如前文所述,国内关于空间自锚式悬索桥设计和计算方法的资料不多,所以在计算时则根据桥梁的实际受力情况,应用空间结构软件建模进行结构分析计算,并根据计算结果调整主缆的设计数据。具体的计算分析方法分为两个步骤进行,第一个步骤是确定整体结构形成前状态(无应力索长状态),第二个步骤是确定包含加劲梁、索塔墩等全部结构体系形成后的状态。

第一个步骤,使用上述简化计算方法进行简化的初始平衡分析,在此阶段通过输入的加劲梁的均布荷载、主缆两端的坐标、主缆中间点的垂度,确定主缆的水平力和其三维坐标。

第二个步骤,为精确的平衡分析阶段,是使用第一个步骤得到的主缆坐标、水平张力和初始无应力索长,利用索单元的柔度矩阵重新进行非线性迭代分析。当获得了所有主缆单元的精确无应力长之后,则构成由主缆和吊杆组成的索体系。主缆两端、索塔墩底部、吊杆下端均按固结处理。当将简化计算出的初始坐标、初始无应力索长和初始初拉力赋予索单元时,将产生不平衡力引起结构变形,然后根据主缆坐标和索力增量的变化值对坐标进行更新调整,即反复更新主缆坐标值和缆力,并设定收敛值为 10^{-5} ,进行非线性迭代计算判断收敛与否,如不收敛时,则更新坐标和初拉力值,重新计算直至收敛,至此分析结束。

3.2 悬索桥整体结构体系平衡状态计算

以主缆坐标、无应力索长、水平张力为基础,进行悬索桥整体结构的初始平衡状态分析。

自锚式悬索桥的加劲梁受较大轴力的作用,加劲梁端部和索墩锚固位置会发生较大变化,即主缆体系将发生变化,所以从严格意义来说前面计算获得的索体系和无应力长与实际并不相符。所以必需对整体结构重新进行精密分析。

对于自锚式悬索桥,将主缆和吊杆的力按静力荷载加载到由索塔墩和加劲梁组成的杆系结构上,计算加劲梁和索塔墩的初始内力,并将其作用在整体结构上。通过反复计算直至收敛,获得整体结构的初始平衡状态。据此计算方法,对天津富民桥2根主缆索单元(每根主缆16个单元)进行分次迭代非线性计算,最终求出主缆各索单元内力、成桥和空缆坐标,计算结果见表1(未例出主缆坐标)。

表 1 索单元内力(分次迭代非线性形计算)			
主缆索单元	内力/kN	吊杆单元	内力/kN
1	33 675.360	35	1 830.884
2	33 067.983	36	1 218.859
3	31 941.691	37	1 228.575
4	31 221.030	38	1 234.264
5	30 534.985	39	1 238.593
6	29 888.737	40	1 240.920
7	29 285.904	41	1 240.336
8	28 730.258	42	1 236.013
9	28 225.633	43	1 228.057
10	27 775.623	44	1 217.453
11	27 383.047	45	1 205.171
12	27 049.649	46	1 189.654
13	26 776.231	47	1 171.597
14	26 563.175	48	1 482.853
15	26 409.785		
16	26 297.183		

3.3 计算方法验证

为验证该计算方法的正确性,采用空间有限元软件 Ansys,输入上述方法计算出的主缆坐标及各控制点坐标和初拉力,设定各单元实常数及材料属性,生成单元,建立空间有限元模型,设定迭代次数和收敛精度为 10^{-5} ,进行非线性迭代分析计算.最终求出主缆各索单元内力、成桥和空缆坐标.计算结果见表 2(未例出主缆坐标)。

表 2 索单元内力(Ansys 软件计算)			
主缆索单元	单元轴力/kN	吊杆单元	单元轴力/kN
1	33 161.000	37	1 784.500
2	33 056.000	38	1 210.900
3	31 959.000	39	1 228.800
4	31 244.000	40	1 237.100
5	30 559.000	41	1 239.000
6	29 912.000	42	1 242.000
7	29 310.000	43	1 239.200
8	28 754.000	44	1 235.900
9	28 250.000	45	1 228.400
10	27 800.000	46	1 218.400
11	27 407.000	47	1 206.900
12	27 072.000	48	1 191.500
13	26 796.000	49	1 172.100
14	26 580.000	50	1 486.100
15	26 421.000		
16	26 297.000		

3.4 计算结果对比

由计算结果可以看出,2 套软件计算出的索单元内力相差不大,主缆缆力相差 2%,吊杆内力相差 3%,主缆坐标相差值见表 3。

表 3 主缆坐标 mm			
主缆坐标最大差值	纵坐标 X	横坐标 Y	竖坐标 Z
成桥状态	43	21	4
空缆状态	78	49	0

4 结语

独塔空间索面自锚式悬索桥是一个桥型结构美观大方、结构新颖、气势雄伟的桥型。自锚式悬索桥缆索锚固于梁内,整个结构产生的内力均由其自身承受,加劲梁内存在较大的内力,而在外部形成了一个静定体系,所以自锚式悬索桥无需修建大体积锚碇,特别适用于地质情况较差的地区。在中小跨径上是很有竞争力的方案。通过结构分析、计算,表明这种桥梁结构型式整体受力较为复杂,锚固区局部应力较大,施工难度大,由于主缆非线性影响,使张拉吊杆成为一个比较复杂的过程,在设计、计算时应注意的问题较多。文中所谈仅为自锚式悬索桥主缆设计、计算的问题,要完成一个完整的悬索桥计算,其余相关问题仍然很多,尚待解决的问题也很多,应配合一定的模型试验,对自锚式悬索桥进行更进一步的理论和实践的研究。

参考文献:

[1] 张哲. 混凝土自锚式悬索桥[M]. 北京:人民交通出版社,2005.

[2] 楼庄鸿,译. 自锚式悬索桥[J]. 中外公路,2002.

[3] 罗喜恒,肖汝诚,项海帆. 空间缆索悬索桥的主缆线形分析[J]. 同济大学学报,2004,(10).

[4] 罗喜恒. 悬索桥缆索系统的数值解析法[J]. 同济大学学报,2004.

[5] 沈锐利. 悬索桥主缆系统设计及架设计算方法研究[J]. 土木工程学报. 1996,29(2).

[6] 郑本辉,戴利民. 自锚式悬索桥施工过程的几何非线性缆索计算[A]. 2004 年中国公路学会桥梁结构工程学会论文集[C],2004.

[7] 张志国,靳明君,肖进月. 空间曲线主缆悬索桥施工控制计算[J]. 石家庄铁道学院学报,2003,(4).

[8] 美国ANSYS 公司北京办事处. ANSYS 单元手册[M]. 1998.

[9] 龙驭球. 有限元概论[M]. 北京:高等教育出版社,1991.

文章编号: 0451-0712(2006)12-0005-04

中图分类号: U448.27

文献标识码: A

应用碳纤维索的大跨径斜拉桥抗风性能研究

张新军, 应磊东

(浙江工业大学建筑工程学院 杭州市 310014)

摘 要: 为了探讨碳纤维复合材料在大跨径斜拉桥中应用的可能性, 以拉索等轴向刚度为原则, 拟定了一座主跨为 500 m 的应用碳纤维索的大跨径斜拉桥, 并运用三维非线性计算理论进行了动力特性、静风特性和空气动力稳定性分析。分析结果表明大跨径斜拉桥采用碳纤维索后: (1) 结构的自振频率有所提高; (2) 静风作用下结构变形增大, 但其静风性能却与钢索斜拉桥基本一致; (3) 空气动力稳定性与钢索斜拉桥基本一致。因此从抗风性能角度而言, 大跨径斜拉桥采用碳纤维索是可行的, 但是拉索截面尺寸应采用等轴向刚度原则来确定。

关键词: 大跨径斜拉桥; 碳纤维索; 动力特性; 静风特性; 空气动力稳定性

20 世纪末, 世界上先后建成了 2 座创跨径记录的大跨径斜拉桥, 一座是主跨为 856 m 的法国诺曼底(Normandie)桥, 另一座是主跨为 890 m 的日本多多罗(Tatara)桥。目前, 跨径超过 1 000 m 的斜拉桥, 即中国江苏苏通大桥(主跨 1 088 m)、香港昂船洲(Stonecutters)桥(主跨 1 018 m), 分别于 2003 年 6 月及 2004 年 5 月动工兴建, 2 座桥均计划在 2008 年建成。进入 21 世纪后, 世界桥梁工程将进入跨海连岛工程建设的新时期, 斜拉桥的跨径仍在继续增大。世界上主要是在亚洲, 还有多座大跨径斜拉桥正在规划中, 其中不乏有主跨超过 1 000 m 的超大跨径斜

拉桥^[1]。斜拉桥作为柔性结构其拉索的力学特性对结构刚度和承载能力有较大的影响, 克服拉索垂度产生的不利因素以及减轻拉索腐蚀和疲劳对桥梁耐久性的影响, 是大跨径斜拉桥结构设计和建成后维护管理的重要课题。

为了减小拉索的垂度并提高结构的耐久性, 本来使用在宇宙、航空领域的碳纤维等新材料在斜拉桥中开始了实验性的应用。与钢材相比, 碳纤维材料(简称 CFRP)具有强度高、自重轻、抗腐蚀、抗疲劳、耐久性好等优点, 而且徐变和松弛等重要指标均优于钢材, 弹性模量选择范围大, 温度变形小。虽然还

收稿日期: 2006-05-18

Design and Calculation of Main Cable of Fumin Bridge in Tianjin City

ZHOU Yong-tao, LI Yi-qian, TU Jin-ping, JIA Jie-feng

(Bridge Technology Co., LTD, China Road and Bridge Group, Beijing 100102, China)

Abstract: According to the mechanical characters of the main cable of self-anchored suspension bridge with spatial cables, the calculation and analysis are carried out and the reliability of the calculation and analysis method is verified by the Fumin Bridge in Tianjin City. The design and calculation of the main cable of the Fumin Bridge is good exploration to construct self-anchored suspension bridge with spatial cables in future and some experiences are accumulated.

Key words: suspension bridge; main cable of self-anchored suspension bridge with spatial cables; mechanical character of main cables; design and calculation method