

文章编号: 1002-0268 (2007) 03-0051-05

自锚式悬索桥空间缆索分析与计算

周泳涛, 鲍卫刚, 韩国杰, 涂金平, 贾界峰
(路桥集团桥梁技术有限公司, 北京 100102)

摘要: 对空间索面自锚式悬索桥主缆的受力特点进行理论分析。以天津富民海河大桥为例, 验证了分析方法与计算方法的可靠性。采用空间模型, 通过两个计算步骤对空间缆索悬索桥成桥状态和空缆状态主缆线形进行分析, 首先是简化的索体系分析, 得出主缆的初始几何形状和主缆水平张力; 然后再进行精确分析, 利用简化计算得出的结果进行迭代计算, 直至收敛。通过缆索受力计算和分析, 为今后设计、修建自锚式悬索桥提供一定的计算和分析方法。

关键词: 桥梁工程; 自锚式悬索桥; 有限元数值分析方法; 空间索面主缆; 线形和内力
中图分类号: U448.25 **文献标识码:** A

Analysis and Calculation of Spacial Cable of Self Anchored Suspension Bridge

ZHOU Yong-tao, BAO Wei-gang, HAN Guo-jie, TU Jin-ping, JIA Jie-feng
(Road and Bridge Corporation Bridge Technology Co.LTD., Beijing 100102, China)

Abstract: The stress of spacial cable of self anchored suspension bridge is analyzed theoretically. The analysis and calculation method are verified credibly by the case study of Tianjin Fumin Haihe bridge. Using spacial model, the linetypes of the cable on the final stage and initial stage are calculated by two steps. The first is achieving the original geometrical linetype of the cable and the horizontal tension of cable by simplified cable model, then the calculation is analyzed accurately, followed by iterative calculation based on the result of the first stage until convergency. By analyzing and calculating the cable's stress, analysis and calculation method can be referred for the design and build henceforth.

Key words: bridge engineering; self anchored suspension bridge; FEA numerical method; spacial cable; linetype and internal force

0 前言

悬索桥是一种传统的桥梁结构形式, 它的跨越能力在各种桥梁结构形式中最大, 一直是大跨桥梁的主要形式。悬索桥通常由承重缆索、索塔、锚碇、直接承受汽车荷载的加劲梁和吊杆组成, 因而在理论上悬索桥应是索和梁的组合结构体系。但因悬索桥的跨度一般很大, 加劲梁的刚度在全桥刚度中所占的比例很小, 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, 如按小变形理论进行线性分析, 将不能反映实际结构的受力状况。因此, 大跨度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。悬索桥在竖向荷载下的分析理论的发展过程体现了人们对悬索桥结构特性的认识逐渐成熟, 其计算理论经历了弹性理论

—挠度理论—有限位移理论3个阶段, 由此构成了近代悬索桥的理论基础^[1,3]。

1 工程概况

天津富民桥为独塔空间索面自锚式悬索桥, 孔跨布置为19+20+19.6 m引桥(3跨混凝土连续梁)+86.4+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, 设计者别具匠心地把5 m宽的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

收稿日期: 2005-12-14

作者简介: 周泳涛(1968-), 男, 云南昆明人, 高级工程师, 从事桥梁工程研究。(zyt6829@126.com)

固于 38.6 m 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预应力混凝土箱梁内,梁下设钢板支座由桥墩支承。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接,桥梁其余约束全部放开,全桥变形由主跨自锚端 320 型伸缩缝完成。桥梁总体布置见图 1 所示。

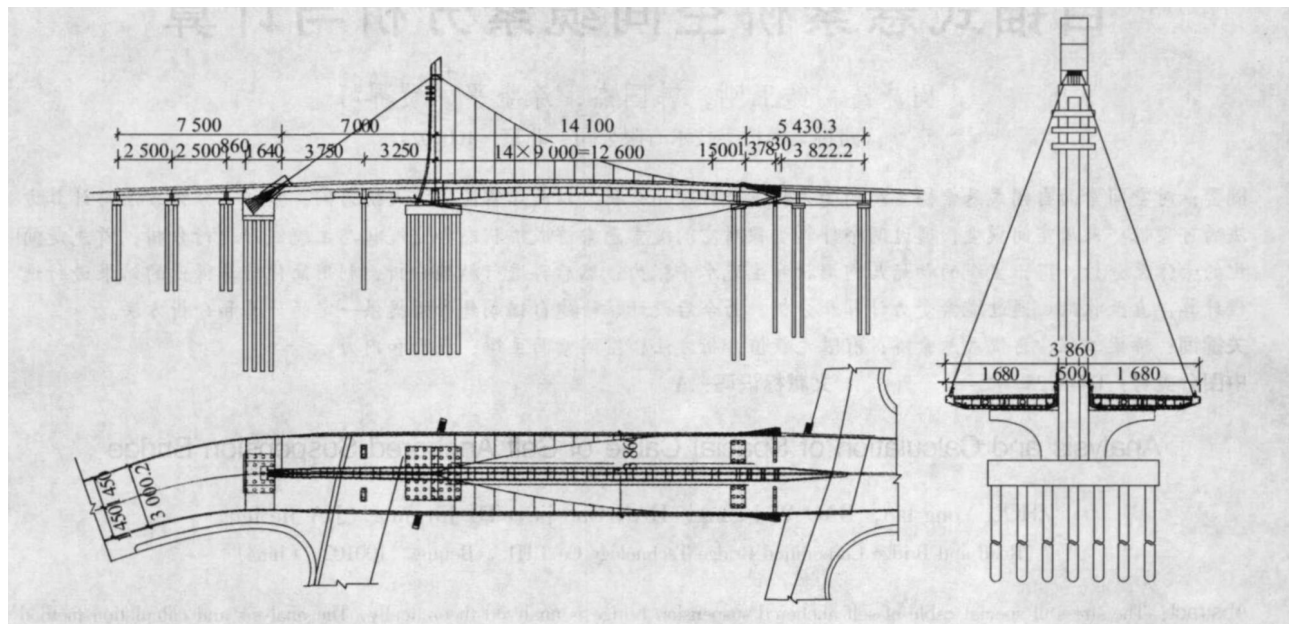


图1 桥梁总体布置图

Fig. 1 General layout of the bridge

2 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,但这种空间索面的自锚式悬索桥设计和修建过的不多,所以其计算方法值得探讨。自锚式悬索桥的解析理论虽然很类似于地锚式悬索桥,但在结构受力体系上和地锚式悬索桥有着很大的区别;由于主缆锚固在梁端,加劲梁需要承受主缆传来的轴向压力。从施工顺序上来说,自锚式悬索桥的施工程序与地锚式悬索桥恰好相反,需先在支架上形成加劲梁以后,才能架设主缆和张拉吊杆,吊索张拉施工又是一个复杂的非线性过程,影响自锚式悬索桥几何非线性的因素很多,主要表现为主缆大位移变形效应。所以自锚式悬索桥解析理论的形式也区别于地锚式体系。近年来自锚式悬索桥以其错落有致的外形而越来越受到设计者、评审者、决策者的青睐,因此对自锚式悬索桥进行具体细致的研究也显得尤为重要。

在地锚式悬索桥挠度理论的基础上,考虑加劲梁的轴向压缩应变能的影响,建立了大位移不完全广义势能泛函,得到自锚式悬索桥体系的基础微分方程,为阐述自锚式悬索桥静力行为提供了理论依据。在此不再叙述具体的推倒过程,仅就工程实例论证说明其

计算方法的正确性^[4,6]。

2.1 以天津富民桥为例进行计算分析

根据自锚式悬索桥的结构受力特点,引入如下假定,并编制程序计算框图。

- (1) 所有的材料符合虎克定律;
- (2) 成桥状态下,恒载沿跨度均匀分布;
- (3) 加劲梁为两端支撑的等截面连续梁,不考虑加劲梁的竖曲线,恒载下加劲梁为无应力状态;
- (4) 不考虑塔的顺桥向抗弯刚度及轴向压缩变形,横桥向刚度为无穷大。

使用精确分析方法确定自锚式悬索桥三维形状,分析应分为 2 个步骤。如图 2 所示,第 1 个步骤确定整体结构形成前状态(无应力索长状态),第 2 个步骤确定包含加劲梁、索塔墩等全部结构体系形成后的状态。

程序内部经历了 2 个步骤的分析过程。第 1 个步骤是使用上述简化计算方法进行简化的初始平衡分析,在此阶段通过输入加劲梁的均布荷载、主缆两端的坐标及主缆中间点的垂度,确定主缆的水平力和三维坐标。第 2 个步骤为精确的平衡分析阶段,是使用前一步骤得到的主缆坐标、水平张力和初始无应力索长,通过非线性分析计算不断地更新主缆坐标、缆力

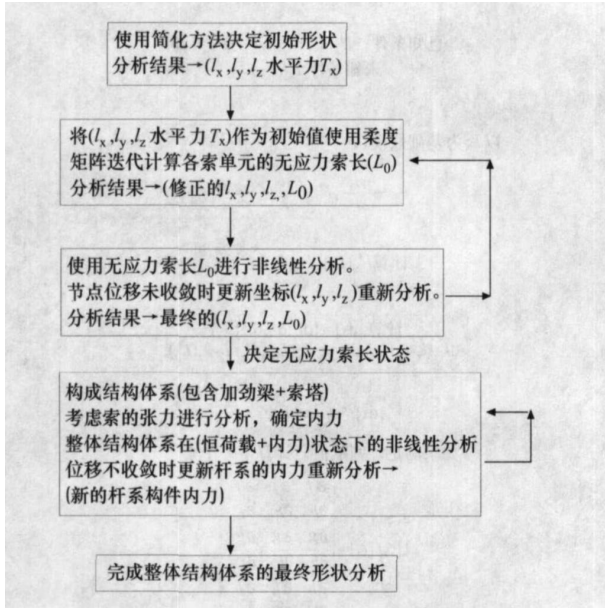


图2 自锚式悬索桥三维形状分析流程图

Fig. 2 Self anchored suspension bridge 3-dimensional analysis flow chart

和无应力索长, 最终确定全部结构形成后的状态。

2.2 简化的索体系平衡状态分析方法

第1个步骤使用的计算方法。

该方法采用了日本 Ohtsuki 博士使用的计算索平衡状态方程式, 其基本假定如下:

- (1) 吊杆仅在横桥向倾斜, 始终垂直于顺桥向;
- (2) 主缆张力沿顺桥向分量在全跨相同;
- (3) 主缆与吊杆的连接节点之间的索呈悬链线形状;
- (4) 主缆两端坐标、跨中垂度、吊杆在加劲梁上的吊点位置、加劲梁的恒荷载等为已知量。

吊杆间主缆的张力分布如图3所示。

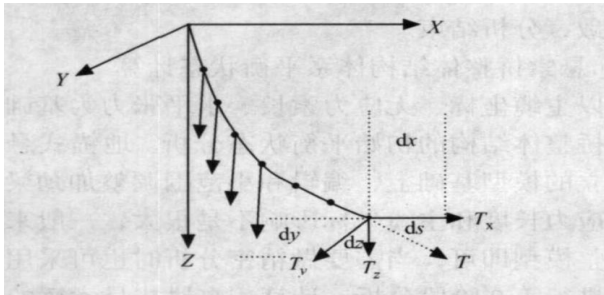


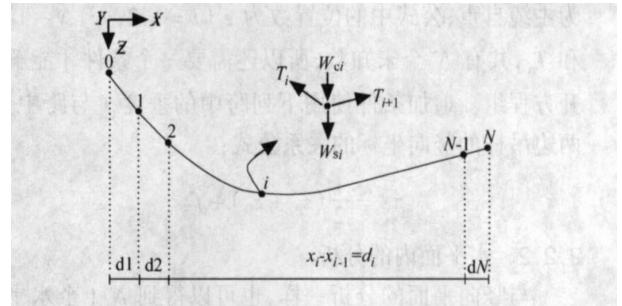
图3 主缆张力

Fig. 3 Tension of cable

一般来说将索分别投影在竖向和水平面上, 利用在各自平面上张力和恒荷载的平衡关系进行分析, 下面分别介绍竖向和水平面的分析过程。

2.2.1 竖向平面内的分析

图4为主缆的竖向平面投影, 假设一个跨度内的吊杆数量为 $N-1$, 则吊杆将该跨分割成 N 跨。

图4 投影在 $X-Z$ 面上的主缆线形和内力平衡Fig. 4 The projecting of linetype on $X-Z$ plane and internal force equilibrium

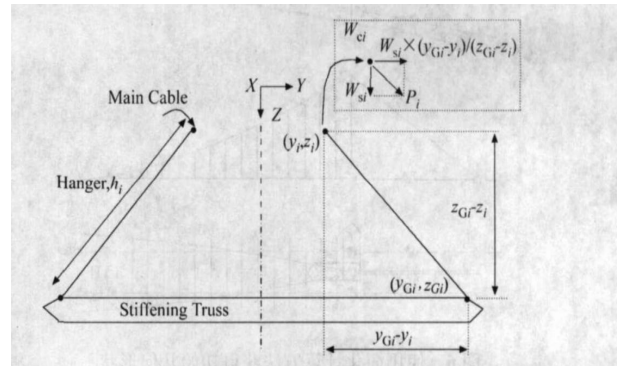
在此, W_{si} 是加劲梁和吊杆平均到主缆上的均布荷载, W_{ci} 是主缆的自重。根据力的平衡条件, 在第 i 个节点位置的平衡方程式如下。

$$T_i \frac{d_i}{l_i} = T_{i+1} \frac{d_{i+1}}{l_{i+1}}, i = 1, 2, \dots, N-1,$$

$$T_1 \frac{d_1}{l_1} = T_2 \frac{d_2}{l_2} = A = T_N \frac{d_N}{l_N} = T_x. \quad (1)$$

式中, T_i 为节点 $i-1$ 和节点 i 之间的主缆单元的张力; l_i 是主缆单元的长度; T_x 是主缆张力的水平分量, 主缆张力的水平分量在全跨相同。

在横桥向, 即 $Y-Z$ 平面上的力的平衡如图5所示。

图5 投影在 $Y-Z$ 面上的平衡Fig. 5 The projecting of equation on $Y-Z$ plane
在 $Y-Z$ 平面上的平衡方程式如下:

$$T_i \frac{z_i - z_{i-1}}{l_i} - T_{i-1} \frac{z_{i+1} - z_i}{l_{i+1}} = P_i \frac{z_{Gi} - z_i}{h_i} + W_{ci},$$

$$i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (2)$$

式中, P_i 为第 i 个吊杆的张力; h_i 为吊杆的长度。

由式(1)和式(2)可以得到 $N-1$ 个方程。

$$T_x \left(-\frac{z_{i-1} - z_i}{d_i} + \frac{z_i - z_{i+1}}{d_{i+1}} \right) = P_i \frac{z_{Gi} - z_i}{h_i} + W_{ci} = W_{si} + W_{ci},$$

$$i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (3)$$

式中, W_{si} 为均分到主缆上的加劲梁和吊杆的荷载; W_{ci} 为主缆自重; 公式中的位置数为 z_i ($i = 1, 2, \dots, N-1$) 和 T_x , 共有 N 个未知数, 所以还需要一个条件才能解开方程组。追加条件使用下列跨中的垂度 f 与跨中、两边吊杆的竖向坐标的关系公式:

$$z_{\frac{N}{2}} = \frac{1}{2}(z_N + z_0) + f。$$

2.2.2 水平面内的分析

与竖向平面的分析一样, 也可以得到 $N-1$ 个水平面内的平衡关系公式:

$$T_x \left(-\frac{y_{i-1} - y_i}{d_i} + \frac{y_i - y_{i+1}}{d_{i+1}} \right) = P_i \frac{y_{Gi} - y_i}{h_i} = W_{si} \frac{y_{Gi} - y_i}{z_{Gi} - z_i} \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad (4)$$

式中, 水平张力 T_x 可由竖向平面内的分析获得, 主缆两端的 y 坐标 y_0, y_N 为已知值, 所共有 $N-1$ 未知数 y_i ($i = 1, 2, \dots, N-1$), 所以方程组可解。

由上面的简化方法确定了初始的几何形状 (主缆坐标、初始无应力索长、加劲梁坐标) 和主缆的初始水平张力, 由这些结果和输入的桥梁几何信息, 可初步形成主缆结构体系 (参见图 6)。

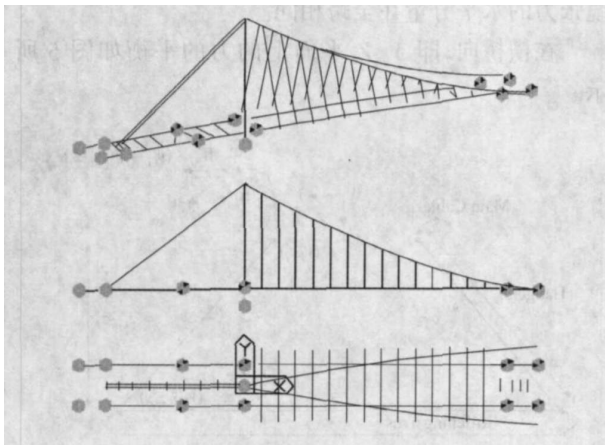


图6 使用简化计算方法获得初始几何形状

Fig. 6 Original geometrical shape achieved by simplified calculation

2.3 精确的索体系平衡状态分析

第2步骤分析, 即初始平衡状态的精确分析流程图如图7所示。

l_i 是主缆单元在 X, Y, Z 方向的长度, F_i 是主缆在 X, Y, Z 方向张力的水平分量, dF_i, dL_i 是主缆在 X, Y, Z 方向张力的水平分量增量和索单元长度的增量, $[C]$ 是柔度矩阵, w 是结构重量。由流程图可看出其过程为根据简化方法计算的结果, 利用索单元的柔度

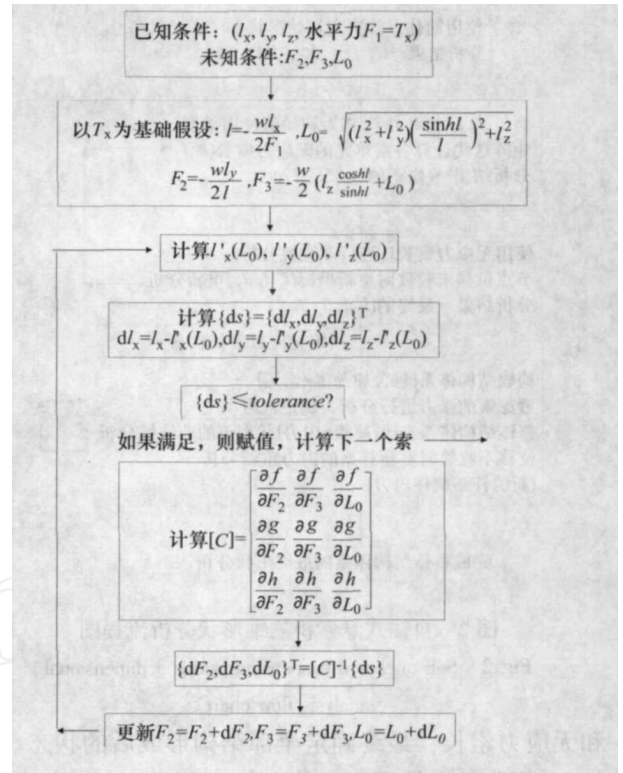


图7 初始平衡状态分析流程

Fig. 7 Initial balance analysis flow chart

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索长之后, 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, 既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, 当不收敛时则更新坐标和初拉力值重新计算直至收敛, 分析结束。

2.4 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。地锚式悬索桥在建立的模型基础上, 编辑和小范围调整加劲梁对索的无应力长度和主缆坐标影响不是很大, 一般来说直接调整模型即可, 当需要做精密分析时也可采用上述操作进行第2阶段分析、计算。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, 从严格意义来说, 前面计算获得的索体系和无应力索长与实际并不相符, 所以必须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^[7~9]。

3 计算结果

按以上所述计算方法, 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, 计算结果如表 1 (未列出主缆坐标)。

表 1 索单元内力

Tab. 1 Tension of cable

主缆		吊杆	
索单元	内力/kN	索单元	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		

为验证该计算方法地正确性, 采用空间有限元软件 Ansys 输入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, 计算结果如表 2 所示 (未列出主缆坐标)。

由计算结果可以看出两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%, 主缆坐标相差值如表 3 所示。

4 结语

通过对天津富民海河大桥的计算分析理论和计算结果的比较, 验证了该计算方法的可靠性, 为我国在自锚式悬索桥的应用和研究提供可借鉴的经验。独塔空间索面自锚式悬索桥美观大方、结构新颖、气势雄伟, 无需修建大体积锚碇, 特别适用于地质情况较差的地区。这种桥梁结构整体受力较为复杂, 锚固区局

表 2 索单元内力

Tab. 2 Tension of cable

主缆		吊杆	
索单元	轴力/kN	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		

表 3 主缆坐标

Tab. 3 Coordinates of cable

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

部应力较大, 施工难度大。本文所述仅为自锚式悬索桥主缆索单元计算问题, 要完成一个完整的悬索桥计算, 尚待解决的问题很多。应配合模型试验, 对自锚式悬索桥进行更深一步的理论和实践研究^[2,5]。

参考文献:

[1] 铁道部大桥工程局桥梁科学研究所. 悬索桥 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1996.

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

[3] 徐风云, 陈德荣, 宋凤立. 自锚式悬索桥评述 [C]. 2005 年中国公路学会桥梁结构工程学会论文集. 2005: 271 - 278.

[4] 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, 32 (10): 1 350 - 1 354.

[5] 罗喜恒. 悬索桥主缆线形的鞍座影响 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (8): 36 - 39, 48.

[6] 沈锐利. 悬索桥主缆系统设计与架设计计算方法研究 [J]. 土木工程学报, 1996, 29 (2): 3 - 9.

[7] 肖汝诚. 确定大跨径桥梁结构合理设计状态的理论与方法研究 [D]. 上海: 同济大学桥梁系, 1996.

[8] 黄平明. 大跨径悬索桥主缆系统施工控制计算 [J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20 (4): 19 - 22.

[9] 谭冬莲. 大跨径自锚式悬索桥合建成桥状态的确定方法 [J]. 中国公路学报, 2005, 18 (2): 51 - 55.