

文章编号:1001-7372(2003)03-0048-04

大跨度钢管混凝土拱桥拱肋吊装 预测的迭代前进算法

袁海庆, 范小春, 范剑锋, 周强新

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 讨论了大跨度钢管混凝土拱桥拱肋吊装施工的特点以及由此产生的吊装预测计算中的问题, 提出了基于迭代理论的前进算法, 较好地模拟了拱肋吊装施工过程, 计算拱肋吊装的预抬标高、各吊装阶段的扣索索力及控制点标高, 为施工和监控提供依据。

关键词: 桥梁工程; 钢管混凝土拱桥; 迭代前进算法; 吊装预测

中图分类号: U448.22

文献标识码: A

Iterative go-ahead method of rib-assembling predicting for long-span concrete filled steel tubular arch bridge

YUAN Hai-qing, FAN Xiao-chun, FAN Jian-feng, ZHOU Qiang-xin

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Discussing the characteristics of rib-assembling construction for long-span CFST arch bridge and the problems in predicting calculation, authors bring up the go-ahead algorithm based on iterative theory. And by which, the pre-elevation of rib-assembling, the cable force and the elevation of each stage in assembling process are calculated. These results will offer the basis for construction monitor and control, and guarantee the arch rib line to meet the design request.

Key words: bridge engineering; CFST arch bridge; iterative go-ahead method; rib-assembling predicting

0 引 言

钢管混凝土拱桥以其在受力性能和施工方式上的优越性, 近年来在中国受到广泛重视并得到迅速的发展。缆索吊装法是大跨度钢管混凝土拱桥最常用的施工方法^[1]。这种方法将拱肋分成若干个节段; 从两岸拱脚起, 用缆索吊机将拱肋节段逐段组装; 每吊装一节就用扣索将该节段扣挂在塔架上, 并与前面相邻的节段焊接为一体; 最后在跨中处合龙; 拆除所有的扣索, 拱肋组装完毕。

由于拱桥的受力特点, 拱轴线的精度是一个特别重要的因素。拱肋吊装的质量要求主要是要保证拱肋线型符合设计规定。但是, 由于拱肋是分段吊装

的, 每吊装一节, 都会对前面已经吊装好的部分产生力的作用, 因此在吊装的全部过程中, 各个节段的坐标都处于变化之中。

为了保证最终的合龙线型满足要求, 应通过预测计算, 为每个节段的吊装设置一个“预抬标高”, 这些预抬标高应该保证在历经后续节段吊装所引起的变化之后, 在合龙时正好达到设计标高; 在预测某一节段吊装标高的同时, 还需要同时给出该节段吊装时各扣索的索力和其它以前已安装节段的标高, 作为施工监控的依据。笔者把上述工作称为“吊装预测”, 它是施工设计的一项重要任务^[2]。

大跨度钢管混凝土拱桥吊装预测算法是一个备受关注的问题。根据吊装预测所提供的预抬标高进

收稿日期: 2002-07-12

基金项目: 湖北省交通厅科研项目(鄂交科教[2001]495号)

作者简介: 袁海庆(1945-), 男, 河南方城人, 武汉理工大学教授, 工学硕士。

行吊装,应在保证满足施工工艺的要求及其它有关约束条件的前提下达到设计线型。对于钢管混凝土拱桥而言,通常的“倒退算法”在适用性上存在着明显的问题。这主要是因为:由于拱肋分节段吊装过程中受力状态的特殊性,在事先无法找到相应于实际吊装过程的“最终状态”,而这个“最终状态”正是“倒退算法”起始点。

笔者主要围绕大跨度钢管混凝土拱桥吊装预测算法的问题,通过分析拱肋吊装施工工艺特点,指出通常的“倒退算法”和“前进算法”的不足,提出基于迭代理论的前进算法即“迭代前进算法”,实现对大跨度钢管混凝土拱桥拱肋吊装预测和施工模拟。在大跨度钢管混凝土拱桥吊装预测计算中,还有一些重要的问题如几何非线性问题、温度影响等,其他学者已有不少研究成果,将不再赘述,但在计算程序中要考虑几何非线性问题。

1 “倒退算法”面临的问题

在桥梁施工中使用“倒退算法”来得到各个施工阶段的标高,就是从成桥的“最终状态”出发,按照与架设相逆的顺序,用倒拆的方法将桥一段段地拆去,直到桥梁架设的初始点,从而计算出架设过程每一阶段中桥的标高与所受内力^[3]。如上所述,这个成桥的“最终状态”就是“倒退算法”的计算起点。

大跨度钢管混凝土拱桥拱肋缆索吊装成拱的过程通常是:重复进行节段吊装、扣挂而完成两个半拱的吊装,合龙,拆除扣索,成拱。在拆除扣索之前,已经吊装的半拱可以看成是一种悬臂结构,拆除扣索之后,转换成为拱结构,完成结构转换。

首先,可否从成拱状态开始倒退计算?从成拱状态开始倒退计算,第一步就是要恢复合龙工序中拆除的扣索,这些扣索的索力应满足的必要条件是:使拱顶合龙处内力为0,这相当于回到合龙成拱前的悬臂状态。但是,由于结构是高次超静定的,根据拱顶处内力为0的条件逆解索力不能得到确定的解。在众多可能的索力解中确定符合线型要求的解,实际上是不可能的。

那么,可否直接从合龙前的半拱悬臂状态倒退求解?笔者注意到,在某一个节段进行吊装时,它与前面节段的联接步骤通常是:先将二者的上弦下弦法兰分别对齐,调整标高后再用螺栓固定并施焊。也就是说,在吊装和调整标高时法兰处一般是不承受拉力的。一般地说,联接截面处力状态的特征是:截面两侧法兰相互作用力的合力作用点应在上下弦之

间,其极限位置在上弦的上顶点和下弦的下顶点,相当于一种偏心受压与受剪相叠加的状态。在计算中,这个节点可以有条件地作为刚结点处理,条件就是联接截面上不得出现

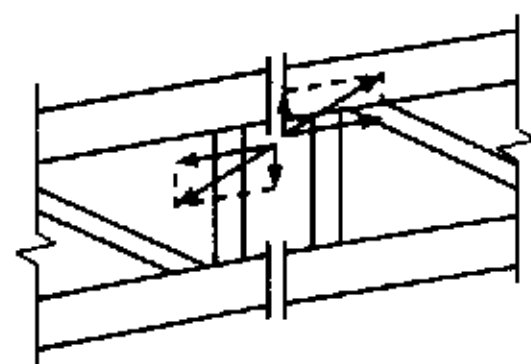


图1 联接截面受力

拉应力。因此,如果以合龙前的半拱悬臂状态作为倒退计算的起点,那么,每拆除一个节段,留下节段的各个联接截面中最远离拱脚的联接截面都应当处于上述力状态,联接截面处两法兰相互作用力的合力作用线应当在上下弦之间(图1)。为了符合这样的条件,作为倒退起点的半拱悬臂状态的扣索力必然是一组特定的力,而预先确定这样的一组索力是难以实现的。

2 基于迭代理论的前进算法

前进算法实际上是施工过程在计算机上的预演。可以依次把拱肋的各个节段按设计的要求拼装到结构上来,从计算上来说就是依次把一个节段迭加到结构上,每迭加1节(假设为第*i*节)就进行一次结构计算,求出各控制点的标高增量 $\{\delta^i\}$ 和各扣索的索力增量 $\{f^i\}$,然后再迭加下一节即第*i*+1节,直至求出拼装最后一节即第*n*节时的标高增量 $\{\delta^n\}$ 和索力增量 $\{f^n\}$ 。任意一个*j*节段吊装时的标高值 $\{\Delta^j\}$ 和索力值 $\{F^j\}$ 为

$$\{\Delta^j\} = \sum_{i=1}^j \{\delta^i\} \quad (1)$$

$$\{F^j\} = \sum_{i=1}^j \{f^i\} \quad (2)$$

当*j*=*n*时,就得到合龙前的标高 $\{\Delta^n\}$ 和扣索索力 $\{F^n\}$ 。这里的“标高”是指控制点实际高程对设计高程的高差。理想的目标是 $\{\Delta^n\} = \{0\}$,这对于通常的前进算法是不可能的,为了达到这个目标,笔者将上述前进算法纳入到一定规则的迭代过程中,通过迭代逐渐趋向理想目标,这就是基于迭代理论的前进算法(以下简称为“迭代前进算法”)的基本考虑。为了便于识别,把上述各向量分别都加上下标“*r*”,代表是第*r*轮计算,即

$$\{\Delta_r^j\} = \sum_{i=1}^j \{\delta_r^i\} \quad (3)$$

$$\{F_r^j\} = \sum_{i=1}^j \{f_r^i\} \quad (4)$$

当*j*=*n*时,就得到 $\{\Delta_r^n\}$ 和 $\{F_r^n\}$ 。

2.1 迭代前进算法的基本思路

在引言部分已经提到,为保证在合龙时拱肋线型满足要求,每个节段吊装时应设置一个预抬标高,这个预抬标高应该保证在历经后续节段吊装所引起的标高变化之后,在合龙时正好达到设计标高。问题在于,笔者事先无法知道这些预抬标高应取多少。为了得到所需要的预抬标高,可采取如下思路:

首先取一组预抬标高初值 $\{z_1\}$ (例如取扣索一半拱体系在自重作用下各节段控制点的挠度的相反值作为这一初值),其中任何一个分量 z_{1k} 代表第 k 节段吊装时的预抬标高。在全部节段模拟吊装完毕,设该节段控制标高将达到 Δ_k^1 (为 $\{\Delta_1^1\}$ 中的1个分量)。

一般来说预抬标高初值 $\{z_1\}$ 不可能设得恰好合适,因此 Δ_k^1 不会等于0, $\{\Delta_1^1\}$ 不会等于 $\{0\}$,而且很可能超过允许误差,为此要对预抬标高进行修正。修正的方法是,以 $\{z_2\} = \{z_1\} - \{\Delta_1^1\}$ 为第二轮计算的预抬标高初值,重新进行前进计算,得到 $\{\Delta_2^1\}$,如果误差仍然偏大,就仿照上述方法再进行修正,直至误差减小到允许水准。

在经过若干轮(设为 m 轮)的迭代之后,标高误差将减小到允许的范围,则最后一轮迭代所用的预抬标高初值 $\{z_m\}$ 就是笔者所确定的预抬标高,所得到的最终合龙标高值 $\{\Delta_m^1\}$ 可以反映最终拱肋线型的精度。

在最后一轮迭代中,代表各节段依次吊装的各个计算阶段的结果为笔者提供了具有重要价值的数。例如, $\{\Delta_m^1\} = \sum_{i=1}^j \{\delta_m^i\}$ 代表第 j 节段吊装时各个控制点的标高, $\{F_m^j\} = \sum_{i=1}^j \{f_m^i\}$ 代表此节段各个扣索的索力状态,这些数据是施工过程监控的重要依据。

2.2 扣索张拉的模拟与张拉长度的确定

在吊装过程中或合龙前都要通过收紧或放松扣索来对拱肋的控制坐标进行调整。在上述迭代前进算法中,对于每一轮迭代中每个当前吊装节段,都需要通过调整扣索张拉长度来实现事先设定的节段吊装预抬标高,并同时计算扣索内力;或者是为了消除吊装误差,要求将指定控制点标高调整一个指定的高度值。这两个问题都归结为:为了使结构满足指定的位移条件,求指定单元自由长度的调整量以及结构的内力。如果把已知单元长度改变量求解结构位移作为正问题,那么上述由指定位移求解单元长度

改变量就是一种反问题。

在正问题的情况下,张拉扣索 i 而使其长度改变 δ_0 ,拱肋各节段控制点的位移的计算可以按下述思路进行。

在单元局部坐标系下,扣索单元的刚度方程为

$$[k]^e \{\delta\}^e = \{F\}^e + \{P_q\}^e \quad (5)$$

式中: $[k]^e$ 、 $\{\delta\}^e$ 、 $\{F\}^e$ 分别为单元刚度矩阵、单元杆端位移向量和单元杆端力向量; $\{P_q\}^e$ 为扣索自重引起的单元等效结点荷载。

当使用千斤顶张拉扣索时,由于拉出的扣索留在锚具之外,已经不再参与工作,因此扣索的自由长度发生了缩短,设这个缩短量的绝对值为 δ_0 。这种现象在有限元计算中可以等效地考虑为由于某种非力作用的原因(如温度降低)发生初应变 $-\epsilon_0$,而使扣索自由长度缩短 δ_0 ($\delta_0 = \epsilon_0 L$),设单元弹性模量为 E ,截面积为 A ,则由于上述初应变引起的单元的固端反力等于 $EA\epsilon_0$,于是,扣索单元的由于初应变引起的等效结点荷载 $\{\bar{P}_\epsilon\}^e$ 为

$$\{\bar{P}_\epsilon\}^e = -\{R_\epsilon\}^e = [EA\epsilon_0 \quad 0 \quad -EA\epsilon_0 \quad 0]^T \quad (6)$$

于是,式(5)所表示的扣索单元刚度方程可改写为

$$[\bar{k}]^e \{\bar{\delta}\}^e = \{\bar{F}\}^e + \{\bar{P}_q\}^e + \{\bar{P}_\epsilon\}^e \quad (7)$$

对于扣索 i ,由于它实际上会有一定的垂度,利用ERNST公式将其等效弹性模量 E_e 求出之后,笔者就可把它考虑为与其弦长等长度的链杆单元^[4]。

然而,这里有一个问题:用ERNST公式计算扣索单元的等效弹性模量必须预先知道扣索的张力,但是在结构求解之前扣索张力还是未知的量,因此直接求解扣索单元的等效弹性模量实际上是不可能的。在实际计算时,对于第 i 个扣索单元,可以先把它近似地当作直杆,以扣索钢绞线弹性模量 E_0 为索单元的等效弹性模量初值进行结构计算,得到索力的第一轮近似值。以索力的这一轮近似值代入ERNST公式求出索单元的等效弹性模量 E_{e1} ,再进行第二轮结构计算。将计算出的索力值与上一轮的索力值相比较,如果差值过大,则按上述过程再进行下一轮迭代,直至计算结果满意为止。上述迭代结束,也就同时得到了结构的结点位移,包括各控制标高,并且可由式(7)求出扣索索力。

在钢管混凝土拱桥吊装预测计算中,主要面对的是上面提到的反问题。这一问题需要通过下述迭代步骤解决:

(1)先设定扣索张拉长度初值(比如就以扣索原

长情况下在重力作用下的控制点挠度在扣索方向上的投影作为张拉初值)。

(2)以给定的扣索张拉值,按上述正问题解法求出控制点的实际标高。

(3)将所求出的控制点标高与指定标高相比较,如果误差满足要求则停止迭代并转入步骤(5),否则转入步骤(4)。

(4)将所求出的控制点标高与指定标高的差值反号(为了保证迭代收敛,可以将这个差值乘上一个小于1的正数作为迭代因子),向扣索方向投影并与上一轮的张拉值相加,作为扣索新一轮计算的张拉长度值,转入步骤(2)进行迭代计算。

(5)输出扣索张拉长度值和索力值。

2.3 当前吊装节段与已吊装部分结点的处理

这类结点的处理要根据吊装工艺的要求而定。通常吊装都是先将法兰对准,调整标高后进行焊接。对于允许法兰有微小脱离的情况来说,可以把结点当做临时铰结点。但究竟这个铰是在上弦还是在下弦,要通过试算确定。对于不允许法兰脱离的情况来说,新吊装的节段与已经吊装部分联接截面的轴向受力状态类似于偏心受压,拱肋的上弦与下弦联接处只能承受压力,不能承受拉力,但又不能脱离(有的工程如武汉晴川桥允许施工中有1 mm的脱离,对于其高达5.5 m的拱肋截面来说,实际上可以按“不能脱离”考虑)。

这样在标高调整时和围焊后,新老节段联接处的计算简图是不同的。围焊后是典型的刚结点。吊装时只能“有条件地”处理为刚结点,需要采取试算的方法以保证上述受力特点。这一试算过程可通过迭代计算来完成。这一做法是保证计算与吊装工艺相符合的一个关键。

根据上述对迭代前进算法的分析,其整体计算过程如图2所示。从图2可以看到,整个计算过程中用虚线方框划分出了4层迭代过程。从最外层起,第1层以 r 为循环变量,它以设定的或修正的预抬标高按正常的前进算法,逐段地组装每一个拱肋节段并进行计算;第2层以 j 为循环变量, j 是当前吊装的节段号,这层迭代完成吊装某一个节段时的计算;第3层迭代是在吊装某个节段时,通过调整扣索张拉量来实现控制标高的预定值,即完成上述“反问题”的计算;第4层是在吊装某个节段中,当某次调整扣索张拉量时等效弹模的修正。在图2中“修改结构刚阵,结构计算”步骤中,要计入结构的几何非线性影响。

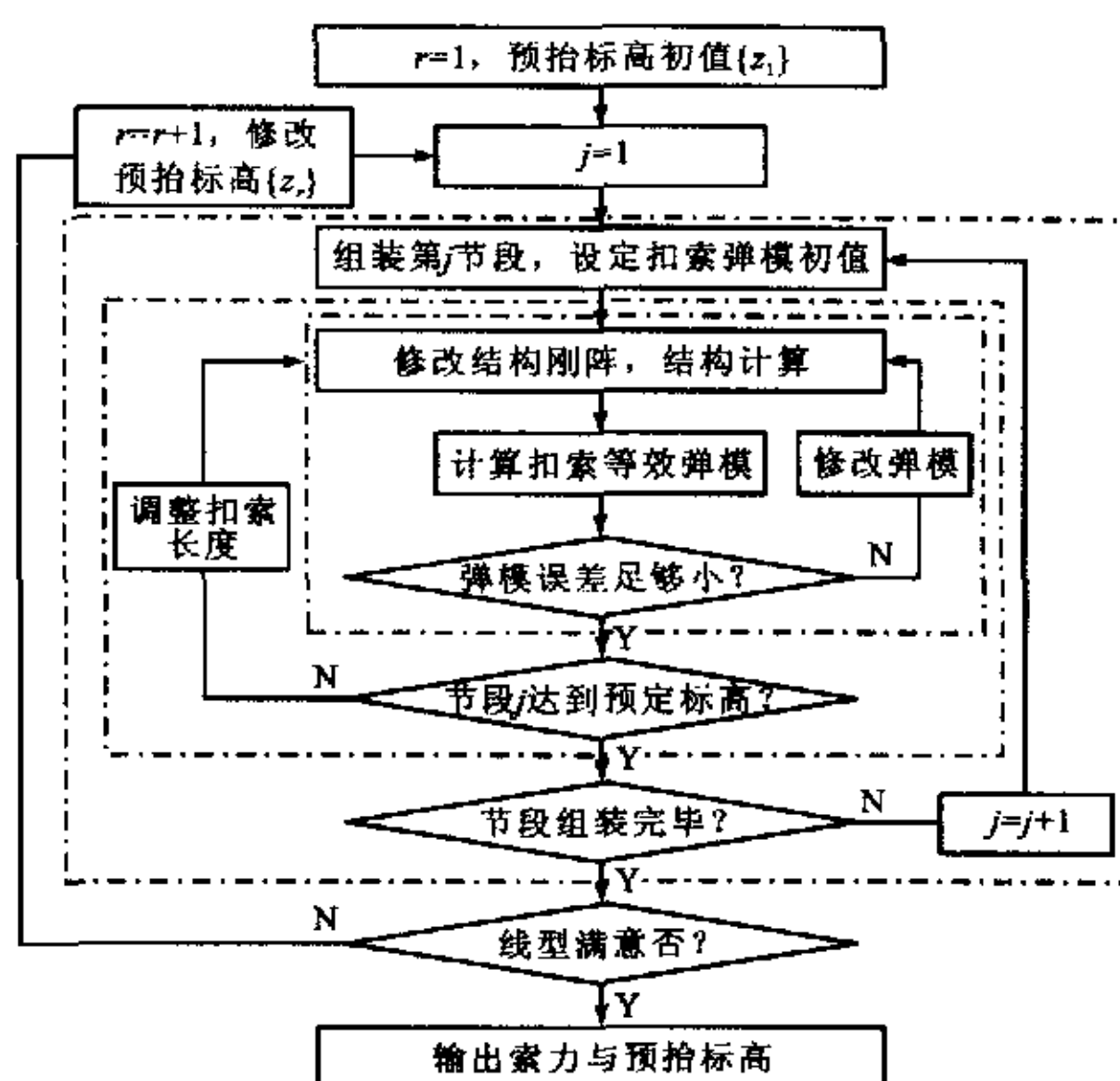


图2 迭代前进算法

3 计算实例

南里渡特大桥是湖北省恩施土家族自治州境内318国道改线扩建工程中的一座上承式钢管混凝土拱桥,跨度220 m,矢跨比为1/5,上下游拱肋各分12个节段,由两岸拱脚向河心分段吊装。施工方案为吊装时先用螺栓将接头临时联接,待标高调整完毕后进行螺栓紧固并围焊。其吊装系统见图3。

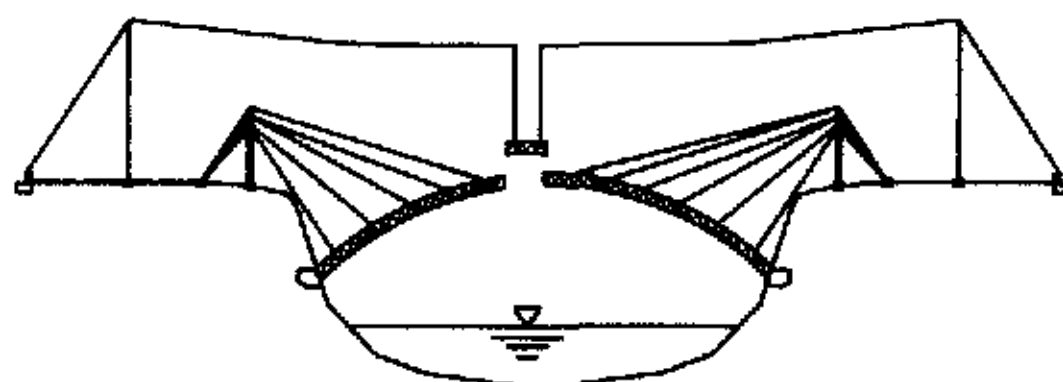


图3 南里渡大桥拱肋吊装

根据南里渡大桥钢管拱肋吊装的要求,运用迭代前进算法进行预测计算,经过4轮迭代,得到的预抬标高方案可使合龙标高满足吊装施工精度要求(拱顶竖向位移偏差在15 mm之内,拱肋1/4处的偏差在10 mm之内^[5])。吊装全过程中各阶段控制点标高变化情况预测见图4,其中吊装第6节段时的各控制点标高就代表了合龙前的拱肋线形。

4 结 语

迭代前进算法是基于迭代理论的前进算法,它通过逐步修正的方法求得各个拱肋节段吊装时的预抬标高值、各吊装阶段扣索索力计算值和各拱肋节段控制标高值;该方法并对扣索张拉进行了较好的

(下转第57页)

型。笔者仅选取了铺装层危险部位承载能力的极限状态,从一个方面揭示了它的机理,得到可靠度的基本数据,这是有重要价值的,是可靠性研究的深入和发展。另一方面,影响铺装层性能的因素还有很多,如温度变化、混凝土收缩徐变、混凝土结构内部的初始缺陷(裂纹、空隙、表面不平整)以及车辆荷载冲击和制动的动力效应等,都会影响桥面铺装层的可靠性。如果将这些因素作为确定性变量考虑,其计算当然并不困难;但按可靠性理论的要求,一般应作为随机变量考虑,特别是变异性较大的变量,必须按随机变量处理,而目前还没有这方面的统计资料可供参考,限于时间及人力等条件,一时难以得到它们的分布规律和统计参数,故笔者也暂未考虑,这些问题只能待今后进一步研究解决。

参考文献:

- [1] 王虎,胡长顺,王秉刚.简支梁支座处桥面连续铺装层结构计算分析[J].西安公路交通大学学报,2000,20(4):1—3.
- [2] 张占军.水泥混凝土桥面沥青铺装层厚度的研究[J].西安公路交通大学学报,2000,20(2):16—19.

- [3] MOSES F, RASHED L. The application of system reliability to structural safety [R]. Florence: CERRA-ICASP, 1998.
- [4] BUCHER G C, BOURAUND U. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems[J]. Structural Safety, 1990, 7(1): 57—66.
- [5] LIU Ying-wei, MOSES F. A sequential response surface method and its application in the reliability analysis of aircraft structural system[J]. Structural Safety, 1994, 11(1): 39—46.
- [6] 帅长斌.公路桥梁桥面结构可靠性分析方法及其应用研究[D].南京:解放军理工大学,2002.
- [7] 南城大桥桥面铺装可靠性研究课题组.南城大桥桥面铺装对结构可靠性的影响研究报告[R].南昌:江西省交通厅,2002.
- [8] 帅长斌,张银龙,常大民.桥面铺装结构模糊可靠性分析与评价[J].西安公路交通大学学报,2001,21(3): 49—51.
- [9] 帅长斌,常大民,湛润水,等.桥面铺装可靠性动态模型研究[J].桥梁建设,2001,33(2): 22—25.
- [10] 李扬海.公路桥梁结构可靠度与概率极限状态设计[M].北京:人民交通出版社,1999.

(上接第51页)

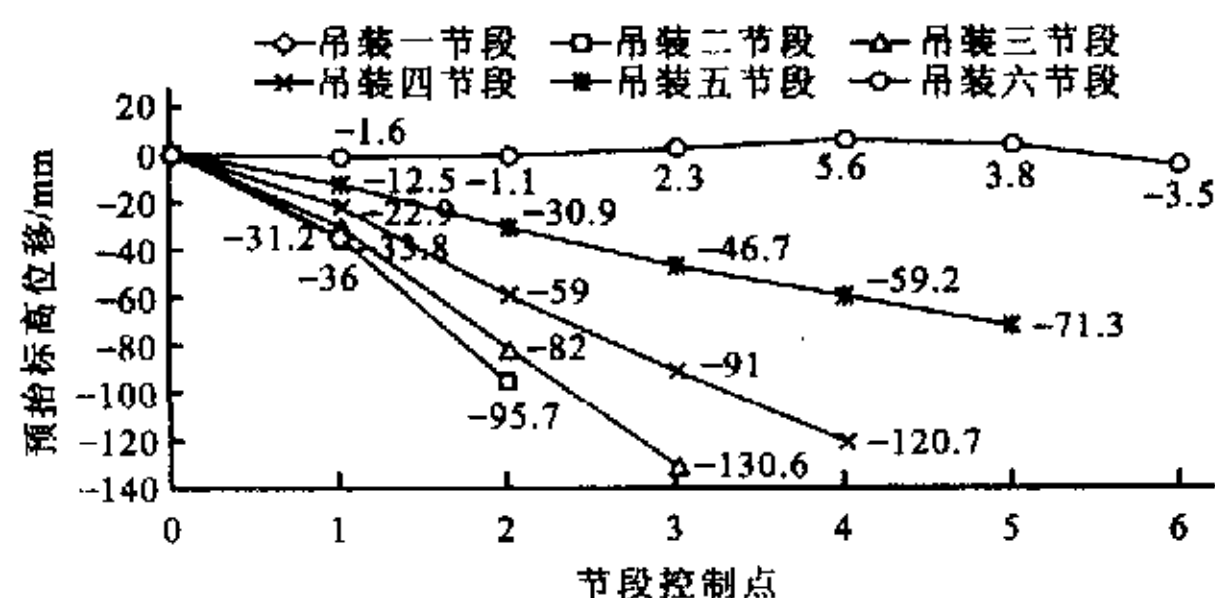


图4 第4次迭代计算的各吊装阶段的控制标高变化

模拟,建立了根据指定的控制标高求解扣索张拉量和索力的方法;考虑到了当前吊装的拱肋节段与已安装部分联接处的特殊受力状态,能够考虑几何非线性影响,收敛速度满意。因此,该方法能够较好地进行大跨度钢管混凝土拱桥吊装预测计算。

由于实际工程的复杂性,对大跨度钢管混凝土拱桥进行精确吊装预测计算受到各种因素的限制,

因此,除了理论预测外,还需要在施工过程中加强监测监控,并根据理论预测与实测数据的比较分析对后续吊装方案进行修正;其它如吊装中塔—拱变形耦合等问题,也尚待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 陈宝春.钢管混凝土拱桥设计与施工[M].北京:人民交通出版社,1999.
- [2] 周汉东,许晓峰,黄福伟.大跨度钢管混凝土拱桥钢管拱肋吊装施工控制[J].哈尔滨建筑大学学报,1995,28(增): 87—92.
- [3] 向中富.桥梁施工控制技术[M].北京:人民交通出版社,2001.
- [4] 王晓明.悬索的变原长计算模式[J].计算结构力学及其应用,1992,9(2): 335—339.
- [5] 袁海庆,范剑锋,范小春.钢管混凝土拱桥拱肋吊装过程的线形优化方法[J].武汉理工大学学报,2002,24(2): 32—35.