

系杆拱桥吊杆初始张拉力的计算方法

彭宣茂

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:针对系杆拱桥施工中的吊杆初始张拉力问题提出一种新的简单实用方法, 该法以每根吊杆应施加的初始张拉力为基本未知值, 根据吊杆的张拉顺序, 采用结构变刚度有限元法求出单位力作用下的吊杆内力矩阵, 建立典型方程, 通过简单的回代方法求出每根吊杆的初始张拉力, 从而使得最终吊杆的预张拉力达到规定的设计值。

关键词:系杆拱桥; 预应力; 内力矩阵; 回代

中图分类号: TU32

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2000)06-0032-02

系杆拱桥^[1]主要由拱肋、吊杆、系杆(纵梁)和桥面系统等组成, 根据拱肋与系杆的相对刚度的大小不同, 通常分为柔性系杆刚性拱、刚性系杆柔性拱和刚性系杆刚性拱三种类型, 其共同优点是拱推力由系杆承担, 结构外部静定, 墩台不承受水平推力, 故可以建造在松软的地基上。随着高强度钢索的应用和预应力技术的发展, 可以用钢索制造吊杆, 而承受拉伸和弯曲变形的系杆则采用预应力混凝土梁, 可显著减轻结构自重, 降低造价, 并便于桥面系与系杆的连接。

系杆拱桥一般采用组件拼装和分期施加预应力的施工方案, 如何控制和调整吊杆的初始张拉力, 从而保证吊杆的受力状态达到最终设计值, 这是吊杆设计和施工中碰到的一个重要而复杂的问题, 因此, 建立合适的力学模型, 探讨实用可行的计算分析方法具有重要的理论和应用价值。本文针对系杆拱桥施工中的吊杆预张拉力问题提出了一种新的简单实用计算方法, 该法根据吊杆的张拉顺序, 采用结构变刚度有限元法^[2]求出单位力作用下的吊杆内力矩阵, 通过回代方法求出每根吊杆的初始预张拉力, 从而使得最终吊杆的张拉力达到规定的设计值。

1 系杆拱桥的分析

根据结构构造的特点和施工条件, 系杆拱桥的施工一般分为以下几个阶段进行: ①在一般满堂脚手架上浇筑系杆(纵梁)并与横梁相连接, 待达到一定强度后, 对系杆施加第一批预应力, 这时系杆和横梁的重量全部由脚手架承担; ②将预制拱肋逐段进

行拼装, 与系杆连成一体, 再拼装拱顶风撑, 这时系杆将受到拱肋自重产生的拉力; ③安装并张拉吊杆, 使吊杆张紧以抵消系杆的部分自重, 吊杆的张拉可采取逐对、对称的张拉方式; ④拆除支承系杆的脚手架, 系杆与横梁的重量由拱桥整体负担; ⑤系杆施加第二批预应力, 使总预应力达到设计值; ⑥最后进行除横梁外桥面系统的施工。

为了获得最佳的设计方案和施工程序, 可以对整个施工过程进行分解, 就各种典型情况进行内力分析, 然后将它们组合成各种可能的施工程序, 最后选出一种最佳的方案, 在各种内力分析中, 张拉吊杆的内力计算是最复杂和困难的。

2 吊杆预张拉力的计算方法

为了绷紧吊杆钢丝索, 并使它们在拆除脚手架前承受一定的预张拉力以抵消系杆的部分重量, 需对吊杆进行张拉, 这种张拉通常按序(从拱顶向拱端或从拱端向拱顶)对称(如不对称, 原理是一样的)地进行, 与其它受力情况分析不同的是, 在分析过程中需要不断改变结构的计算简图, 以从拱顶向拱端张拉的过程分析为例: 如图1所示为某实际系杆拱桥, 一共有11根吊杆(对称布置), 当首先在中间吊杆6—6'中施加张拉力 $T_{6-6'}$ 时, 其它吊杆都未张紧, 因而不能参加工作, 这时结构的内力可由如图2所示的计算简图求得, 当张拉吊杆5—5'与7—7'时, 中间的吊杆6—6'已有预张拉力 $T_{6-6'}$, 能够承受由于 $T_{5-5'}$ 与 $T_{7-7'}$ 引起的不超过 $T_{6-6'}$ 的压力, 故杆6—6'将参加结构的作用, 该杆的总内力等于两次受力的

代数。

同理,再继续张拉其余各对吊杆,计算中考虑的吊杆数将不断增加,例如在张拉 3—3' 与 9—9' 时,计算简图如图 3 所示。该计算简图中吊杆 4—4' 至 8—8' 是受有预张拉力的杆件,能够承受不超过预张拉力的压力,而 $T_{3-3'}$ 和 $T_{9-9'}$ 是已知的张拉力。根据上述方案将可逐步求得各对吊杆张紧过程中各吊杆和结构中的内力。

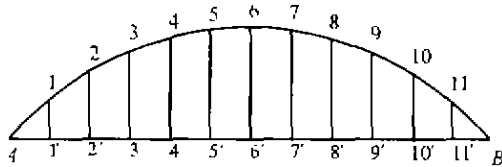


图1 系杆拱桥简图

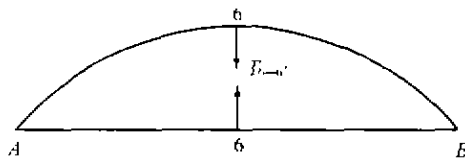


图2 张拉吊杆6—6'的计算简图

可以看出,除了最后一对吊杆(图1中的1—1'和11—11')外,其它吊杆的最终内力都不等于初始的张拉力。在工程中通常希望各吊杆保持一定的预张拉力(如等于系杆重量的几分之一),使吊杆均匀张紧并减小系杆的弯矩。为此,可以按下述步骤求解。

a. 设各吊杆的初始张拉力为 $T_6^0, T_5^0, \dots, T_1^0$, 最终预张拉力(内力)为 $N_6, N_5, \dots, N_1$ 。此处, $N_i (i = 6, 5, \dots, 1)$ 是设计要求的第 i 根吊杆最终保持的预张拉力,是给定的,而 $T_i^0 (i = 6, 5, \dots, 1)$ 是该杆初始张拉时所需的张拉力,是待求的值(由于对称,这里只存在6个独立的量)。现首先求出当初始张拉力 $T_i^0 = 1$ 时各吊杆中的内力 $t_{j,i}$ 。对于图1所示吊杆,可求出由各单位张拉力引起的吊杆内力为: $t_{6,6}, t_{6,5}, t_{5,5}, t_{6,4}, t_{5,4}, t_{4,4}, \dots$, 显然, $t_{6,6} = t_{5,5} = \dots = t_{1,1} = 1$ 。

b. 利用求得的 $t_{j,i}$ 值,可建立求初始张拉力 T_i^0 的方程:

$$\begin{bmatrix} t_{6,6} & t_{6,5} & t_{6,4} & t_{6,3} & t_{6,2} & t_{6,1} \\ 0 & t_{5,5} & t_{5,4} & t_{5,3} & t_{5,2} & t_{5,1} \\ 0 & 0 & t_{4,4} & t_{4,3} & t_{4,2} & t_{4,1} \\ 0 & 0 & 0 & t_{3,3} & t_{3,2} & t_{3,1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & t_{2,2} & t_{2,1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{1,1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_6^0 \\ T_5^0 \\ T_4^0 \\ T_3^0 \\ T_2^0 \\ T_1^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N_6 \\ N_5 \\ N_4 \\ N_3 \\ N_2 \\ N_1 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

方程(1)中的系数矩阵是一个上三角阵,当给定各杆的最终预张拉力 N_i 后,便可以采用简单的回代方法,依次求出需要的初始拉力 $T_i^0 (i = 1, 2, \dots, 6)$ 。

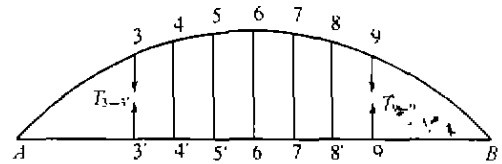


图3 张拉吊杆3—3'和9—9'的计算简图

c. 利用求出的初始张拉力 T_i^0 或直接根据各吊杆中的内力 N_i ,求结构的内力。将上述过程表示为一般通式。设系杆拱桥的吊杆根数为 n ,则

$$tT^0 = N \quad (2)$$

式中: t 为吊杆内力矩阵,可表示为

$$t = \begin{bmatrix} t_{n,n} & t_{n,n-1} & \dots & t_{n,1} & \dots & t_{n,1} \\ 0 & t_{n-1,n-1} & \dots & t_{n-1,1} & \dots & t_{n-1,1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & t_{j,1} & \dots & t_{j,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & t_{1,1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中的元素 $t_{j,i}$ 表示单位张拉力 $T_i^0 = 1$ 作用下,在其余已张拉吊杆中产生的内力,可采用平面或空间结构有限元法求得,但其计算简图和结构的整体刚度随不同的张拉顺序和施工过程而改变; T^0 为未知量列阵,是待求的各吊杆初始张拉力。

$$T^0 = \{T_n^0 \ T_{n-1}^0 \ \dots \ T_1^0\}^T \quad (4)$$

N 为已知量列阵,是各吊杆预张拉力的最终设计值:

$$N = \{N_n \ N_{n-1} \ \dots \ N_1\}^T \quad (5)$$

用回代方法解方程(2),即可求得每根吊杆的初始张拉力,进而求出吊杆张拉力作用下整个系杆拱桥的内力。

3 工程应用

某公路大桥为典型的系杆拱桥,共有11根吊杆(见图1)。采用预应力刚性系杆刚性拱桥方案。该桥跨度 $l = 60\text{m}$,矢跨比 $f/l = 1/5$,拱肋采用普通钢筋混凝土,系杆采用预应力钢筋混凝土,截面都设计成箱形,吊杆采用高合金钢丝索。全桥由两片拱肋—系杆体系组合而成,拱顶设置若干风撑,系杆间用横梁相连接,在横梁上再布置桥面系统。

该桥的主要物理性质和几何特性如下:①混凝土,弹性模量 $E = 3 \times 10^7 \text{ kPa}$,泊桑比 $\mu = 0.167$,重度 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$;②钢材,弹性模量 $E = 2 \times 10^8 \text{ kPa}$,泊桑比 $\mu = 0.25$,重度 $\gamma = 78 \text{ kN/m}^3$;③系杆,实心截面 $A_1 = 1.08 \text{ m}^2$, $I = 0.1296 \text{ m}^4$,空心截面 $A_2 = 0.68 \text{ m}^2$, $I = 0.1083 \text{ m}^4$;④拱肋,实心截面 $A_1 = 1.26 \text{ m}^2$, $I = 0.2058 \text{ m}^4$;空心截面 $A_2 = 0.76 \text{ m}^2$, $I = 0.1641 \text{ m}^4$;⑤吊杆, $A = 0.000823 \text{ m}^2$, $I = 0$ (假定抗弯刚度为零)。(下转第38页)

m, 2.5 m, 3.0 m, 3.5 m. 在 1998 年 12 月潮型, 不同高程情况下, 龙口流速见表 6 (假定涨潮为 +, 落潮为 -).

表 6 100 m 口宽、不同高程下各点最大流速 m/s

高程/m	口外 50 m	口上	口内 50 m	口内 75 m	口内 100 m
2.0(涨潮)	0.76	2.08	2.03	1.45	1.21
2.0(落潮)	-1.40	-2.39	-0.99	-0.57	-0.46
2.5(涨潮)	0.70	2.22	1.82	1.40	1.16
2.5(落潮)	-1.26	-2.24	-0.78	-0.48	-0.38
3.0(涨潮)	0.59	2.10	1.35	1.15	0.96
3.0(落潮)	-1.12	-2.00	-0.60	-0.39	-0.32
3.5(涨潮)	0.47	1.65	0.85	0.77	0.65
3.5(落潮)	-1.03	-1.60	-0.47	-0.33	-0.27

根据以上计算数据, 可以看出龙口合龙期流速小于龙口保护期流速, 合龙时口上最大涨潮流速 2.22 m/s, 最大落潮流速 2.39 m/s, 在施工强度保证

的情况下, 采用吹泥平堵施工, 龙口合龙可以保证.

4 结 语

1999 年 1 月, 浦东国际机场一期围海大堤龙口合龙时, 选择了一个比计算高潮位还要小的潮型, 合龙流速小于计算流速, 龙口顺利合龙.

参考文献:

- [1] 吴江航, 韩庆书. 计算流体力学理论、方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1988, 11.
- [2] 卢永金, 陈美发, 季永兴, 陆建锋. 平面二维水力数学模型在上海水利工程中的应用[J]. 水动力学研究与进展, 1997, 13(增刊): 61~65.
- [3] 许荫椿, 胡德保, 薛朝阳. 水力学[M]. 北京: 科学出版社, 1990, 368.

(收稿日期: 1999-04-10 编辑: 熊水斌)

(上接第 33 页)

在设计中, 采取从拱顶向拱端张拉吊杆的方案. 给定 $N_i = 20 \text{ kN}$, 为常量. 根据平面结构有限元法分别对 6 个计算模型求解, 求得 $[t_{j,i}]$ 中的各系数为

$$\begin{bmatrix} 1 & -1.625 & -0.386 & -0.042 & 0.028 & 0.011 \\ & 1 & -0.558 & -0.145 & -0.003 & 0.008 \\ & & 1 & -0.455 & -0.118 & -0.090 \\ & & & 1 & -0.360 & -0.061 \\ & & & & 1 & -0.178 \\ & & & & & 1 \end{bmatrix}$$

由式(1)解得所需的初始张拉力:

$$T^0 = [T_0^0 \quad T_1^0 \quad T_2^0 \quad T_3^0 \quad T_4^0 \quad T_5^0]^T =$$

$$[100.6 \quad 45.5 \quad 38.1 \quad 29.7 \quad 23.6 \quad 20.0]^T \text{ kN}$$

由此可以看出, 要保持每根吊杆最终的预张拉力为 20 kN, 各根吊杆的初始张拉力必须大于或等于最终的预张拉力. 在最终预张拉力作用下, 拱肋与系杆产生的内力见表 1.

很显然, 对于同一最终预张拉力的设计值, 不同的吊杆张拉顺序, 在各吊杆中施加的初始张拉力大小是不同的, 而吊杆预张拉力引起的结构内力是相同的.

4 结 语

本文根据系杆拱桥吊杆张拉时的受力特点, 提出了一种新的简单实用的求解吊杆初始张拉力的计算方法, 编制了相应的计算机软件. 该软件具有很强的前后图形处理和各种计算功能, 可以解决系杆拱桥设计和施工中常规的计算问题和各种复杂的力学难题, 现已应用于实际工程, 并证明是可行和合理的.

表 1 吊杆预张拉力引起的结构内力

部位	杆号	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/kN·m
拱	A—1	-92.6	69.3	-1073.3
	1—2	-76.9	58.8	-654.3
	2—3	-62.0	48.3	-311.4
	3—4	-49.7	36.1	145.7
	4—5	-40.9	22.4	260.0
肋	5—6	-36.3	7.6	298.1
	A—1'	35.7	-110.0	1073.3
	1'—2'	35.7	-90.0	523.3
	2'—3'	35.7	-70.0	-276.7
	3'—4'	35.7	-50.0	-526.8
系杆	4'—5'	35.7	-30.0	-676.8
	5'—6'	35.7	-10.0	-726.8

参考文献:

- [1] 范立础. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987, 2~10.
- [2] 徐次达等. 固体力学有限元理论方法及程序[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983, 108~125.

(收稿日期: 2000-07-04 编辑: 马敏峰)

