

无背索斜拉桥异形桥塔刚度模拟

吴 迅¹, 王艺桥¹, 李 欣^{1,2}

(1. 同济大学 桥梁工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑设计研究院, 上海 200092)

摘要:对于塔梁固接体系的斜拉桥,塔梁之间的刚度比将直接影响塔梁的荷载分配比例,而对于桥塔倾斜的无背索斜拉桥,塔梁刚度比的确定将更为困难和重要。通过总结长春市伊通河斜拉桥施工仿真计算采取的方法,提出一些通过调整杆系模型抗弯刚度来模拟真实桥塔刚度的看法,希望可以为类似工程提供借鉴。

关键词:无背索斜拉桥;异形桥塔;施工监控;刚度模拟

中图分类号:U445 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-0300(2009)03-0001-04

1 引言

1992年位于西班牙 Alamillo 桥的建成标志着世界上第一座无背索斜拉桥的诞生,此后,无背索斜拉桥就以其独特的魅力赢得了众多设计者的青睐,不到二十年的时间里,仅我国就已经修建了十余座^[1]。无背索斜拉桥给人视觉冲击力最强的部分无疑是它倾斜的桥塔,然而关于桥塔刚度,桥塔应力分布以及施工等方面的问题也困扰着许多工程师,如何在美与实用之间找到一个完美平衡点,值得每一个设计者仔细思考。2000年,捷克共和国的 Mariansky 桥,被国际桥协与结构协会评选为世界十大建筑,可见,无背索斜拉桥的美学景观价值已经得到了世界的公认。为迎接2006年在长春市举办的第六届冬亚会修建的伊通河桥也采用了倒放的V型桥塔,与 Mariansky 桥有着异曲同工之妙。在收集的近二十座国内外的无背索斜拉桥中^[2],只有这两座桥的桥塔截面变化较为明显,其余桥塔均为近似等截面的桥塔,或许这就是 Mariansky 桥的成功所在,现着重分析如何在杆系模型中模拟这种异性桥塔的刚度,以便施工仿真分析的顺利和准确进行。

现代的施工监控需要利用计算机仿真模拟实桥的施工过程,预测施工中可能出现的情况,并对施工起到一定的指导和监测作用,而做到使虚拟的模型与实桥精确吻合是仿真计算的关键问题。仿真模型必需考虑混凝土收缩、徐变,预应力损失等问题,而这些理论都是建立在一维试验的基础上,因此程序计算收缩、徐变,预应力损失时,只能用一维的杆单元来模拟实际结构,才能得出较为准确的结果。但是由于桥塔的奇异构造,而且是高次超静定结构,杆单元难以准确地模拟桥塔的刚度,这样就需要调整一维单元的刚度,使其与三维单元的刚度相同,才能取得较好的效果。通过对伊通河桥这座无背索斜拉桥异形桥塔刚度模拟的讨论,提出一些想法和观点。

2 总体分析

伊通河桥整体布置图如图1所示,主塔为全预应力混凝土结构,横向构型为A型,塔高65m,主梁顶面上高60m,主塔轴线后倾约62°。主塔迎索面塔壁坡度为3.1:5,背索面塔壁坡度为2:5。纵桥向,桥塔成为一个倒放的V型构造,V字中间用10m半径的圆弧过渡。对于这样的超静定结构,相对刚度的大小,决

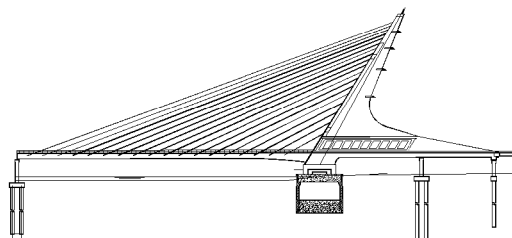


图1 伊通河桥整体布置图

收稿日期:2009-09-01

作者简介:吴迅 男 1958年出生 教授

定了内力大小的分配,因此准确确定桥塔刚度是非常必要的。

3 等效刚度法^[3]的尝试

在结构理论解析中,往往把斜塔等效于一根等截面的悬臂梁,如图 2 所示,借此来简化超静定的计算分析。等效的原则是塔顶在水平力的作用下,水平位移相等。

而对于本桥塔刚度的等效是否有效,关键在于其他拉索作用点的位移误差是否在容许范围内。下面参考国内外的几座无背索斜拉桥的斜塔资料,并利用有限元软件,验证这种等效的合理性。

如图 2 所示,建立水平的悬臂梁,鉴于无背索斜拉桥桥塔截面均为矩形或箱形,且沿横桥向宽度不变,这里悬臂梁梁截面为矩形,厚度大小为 1 且不变,悬臂梁端为 a ,固定端为 b ,且 $b = a + kl$, k 为截面渐变率,悬臂梁长为 l ,等效悬臂梁高为 c ,作用于梁端单位力 $P = 1$ 。

如图 2 建立坐标系,坐标为 x 处的截面惯性矩为

$$I_x = (a + kx)^3/12 \quad (1)$$

单位力 $P = 1$ 作用时, x 截面处产生的弯矩是

$$M_x = x \quad (2)$$

由虚功原理梁端产生的位移为

$$\delta = \int_0^l \frac{M_x^2}{EI_x} dx = \int_0^l \frac{12x^2}{Ek^3(a/k + x)^3} dx \quad (3)$$

令 $t = x + n$, $n = a/k$ 。 $x = 0$ 时, $t = n$; $x = l$ 时, $t = l + n$ 。积分换元得

$$\delta = \int_n^{l+n} \frac{12(t-n)^2}{Ek^3 t^3} dt = \frac{12}{Ek^3} \left[\ln \frac{l+n}{n} - \frac{l(3l+2n)}{2(l+n)^2} \right] \quad (4)$$

把 $n = a/k$, $b = a + kl$ 代入(4)式得

$$\delta = \frac{12}{Ek^3} \left[\ln \frac{b}{a} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a}{b} \right) \left(3 - \frac{a}{b} \right) \right] \quad (5)$$

可以看出,位移 δ 是关于 a/b 的函数,令 $y = a/b$, 式(5)变形为

$$\delta = 12 \left[-\ln y - (1-y)(3-y)/2 \right] / Ek^3 \quad (6)$$

对 y 求导数

$$d\delta/dy = -\frac{12}{Ek^3} (\sqrt{y} - 1/\sqrt{y})^2 \quad (7)$$

可见位移 δ 是随 $y = a/b$ 增大而递减的, $y_{\max} = a/b = 1$, $\delta_{y=1} = 0$, 所以,积分式(5) > 0 。对于等截面的等效梁,单位力 $P = 1$ 作用时产生的梁端位移为

$$\delta_e = l^3/3EI = 4l^3/Ec^3 \quad (8)$$

将(5)、(8)式联立得

$$c = 3^{-1/3} (b-a) \left[\ln \frac{b}{a} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{a}{b} \right) \left(3 - \frac{a}{b} \right) \right]^{-1/3} \quad (9)$$

由式(9)可见, c 值的计算与 k 是无关的,仅与 a 、 b 有关。根据现有无背索斜拉桥,收集了 5 座无背索斜拉桥桥塔截面资料, c 值计算如表 1,可以看出,伊通河无背索斜拉桥截面变化率 k 最大, a 、 b 的差值也最大。

表 1 c 值计算表

桥名	塔长 s	桥塔截面					1/3 塔高处
		横桥厚 d	顺桥 a	顺桥 b	渐变率 k	等效 c	
苏州石湖大桥	92.0	2.25	4	14	0.11	10.5	10.67
昆山夏驾河桥	49.4	3.2	2.24	5.52	0.07	4.48	4.43
常州东岱大桥	90.9	2.25	4	10	0.07	8.08	8.00
景德镇白鹭大桥	88.0	3.5	5.6	8	0.03	7.34	7.20
伊通河桥	67.3	3	2.5	15.7	0.20	10.6	11.30

下面计算悬臂梁其他受力点(主要指拉索作用点)位移误差,讨论等效刚度的合理性。从实际桥例的

截面变化率来看, k 的取值在 0.03 ~ 0.20 之间, 变化较大, 因此采用有限元程序 Midas, 把 5 座实桥全部计算进行比较。

分别在塔端加载竖向集中力 $P = 200$ t, 计算悬臂梁其他受力点 (主要指拉索作用点) 位移误差, 并统计误差百分比, 最终绘制把上述 5 座桥的相对于在塔上位置位移误差整理如图 3 所示。图 3 中横轴为塔上位移节点相对于塔上的位置, 0 表示塔端, 0.5 表示桥塔中点。

从图 3 中可以看出, 位移差随跨径基本是线形变化的; k 值越大, 则位移差随塔长的变化越急剧, 如伊通河桥截面变化率 $k = 0.20$, 斜率最大。东岱大桥和夏驾河桥桥塔截面变化率均 $k = 0.07$, 尽管两者桥塔长度分别为 92 m、50 m, 截面特征值 a 、 b 、 d 的取值也不相同, 但是从图表中可以看出, 两条曲线几乎吻合。这说明对于矩形截面桥塔, 位移差随塔长的变化, 只与截面变化率有关, 与桥塔长度、桥塔截面大小无关。从桥塔中点的位移差值百分比可以看出, k 值越大, 其值越大。当 $k = 0.03$ 时, 差值百分比为 11.1; $k = 0.20$ 时, 差值百分比高达 95.8, 位移误差接近实际变形的一倍, 由此可见, 截面变化率 k 越大, 这种等效的误差也越大。

综上所述, 当截面变化率 $k > 0.03$ 时, 用等截面桥塔等效变截面桥塔进行解析分析计算是不合适的, 伊通河桥桥塔截面变化率 $k = 0.20$ 远大于 0.03, 不能用等效等截面来计算分析。换言之, 为达到相同刚度, 变截面桥塔更加节省材料, 而从梁塔理想平衡的角度出发, 桥塔等截面变化最为理想。所以, 工程中桥塔采用何种截面形式, 应该综合考虑。

4 单元刚度调整的尝试

单元刚度包括轴向刚度 EA 和抗弯刚度 EI , 究竟调整哪一项, 亦或是均需调整, 才能得到理想的结果, 不妨做个比较, 即先固定其中一个参数, 改变另外一个参数, 然后再颠倒过来, 比较这两个参数对桥塔刚度的影响, 假设塔顶承受纵桥向 10 000 kN 的集中力, 经计算并整理成表 2 和表 3。从表 2 可以看出, 尽管截面面积大小成数量级的变化, 桥塔顶端位移几乎不变, 说明单元的截面轴向刚度对桥塔刚度的几乎没有影响。从表 3 计算结果表明, 当惯矩大于 30 m^4 且以 10 m^4 为单位增大时, 塔顶位移以 0.2 mm 的增量在变化, 也就是说, 当惯矩足够大后, 单元的截面抗弯刚度对桥塔的刚度影响很小。至此, 明确了通过调整抗弯刚度是比较有效调整桥塔刚度的方法。

表 2 塔顶 X 向位移表 (假定单元惯矩不变)

面积大小/ m^2	0.1	1	10	100
水平位移/cm	6.61	6.61	6.61	6.55

表 3 塔顶 X 向位移表 (假定单元截面面积不变)

惯矩大小/ m^4	10	20	30	40	50	60
水平位移/cm	6.91	6.76	6.69	6.65	6.62	6.59

既然可以看出当桥塔顶端位移受抗弯惯矩大小影响明显, 且惯矩越小, 影响越明显, 那么不妨再次细分, 以 1 m^4 为递增量, 计算惯矩大小在 $1 \sim 5 \text{ m}^4$ 范围内塔顶水平位移分别为 7.77、7.48、7.31、7.19、7.11 cm, 惯矩大小 10 m^4 水平位移为 6.91 cm (单元截面面积 2 m^2 不变)。上述计算表明, 单元的截面的抗弯刚度是影响桥塔刚度的主要参数, 影响明显的范围是截面惯矩在 $1 \sim 30 \text{ m}^4$ 之间, 且惯矩越小, 影响约明显, 截面面积为 2 m^2 , 惯矩为 3 m^4 时, 桥博模型计算的塔顶位移和 ANSYS 模型计算相同。

然而, 桥塔刚度的等效, 不是指桥塔顶端位移相等, 而是在斜拉索作用点的位移相等, 刚度才是完全等效。尽管要使得所有作用点的位移完全相等, 似乎不太可能。所以, 桥塔刚度等效也只能是近似的等效。首先, 比较塔顶承受纵桥向 10 000 kN 的集中力作用下位移相等时, 沿桥塔高度, 两模型各拉索作用点水平位移的差值, 计算结果如图 4 所示。

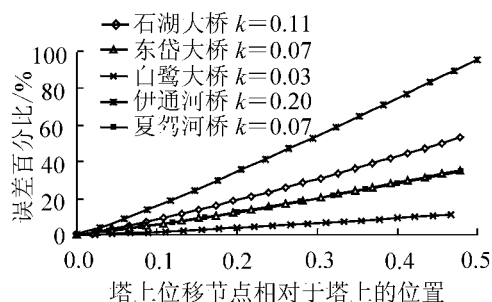


图 3 位移误差随 k 值变化图

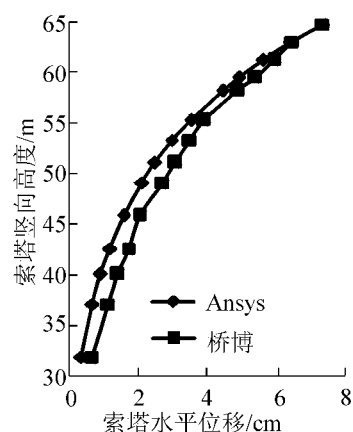


图 4 位移比较图

从图 4 可以看出, ANSYS 模型和桥博模型, 在相同水平力作用下塔顶位移相同时, 塔顶以下各索力作用点的位移, 桥博模型计算的都要大^[4]。因此, 计算表明, 以拉索各作用点位移全部相等, 是无法做到的, 只能近似相等。要使得拉索各作用点的位移相近, 塔顶位移相等是不确切的, 桥博模型计算的塔顶位移应该略小于 ANSYS 模型计算的塔顶位移, 才能使得拉索作用点位移近似精度更大。位移近似相等时, 遵循一个原则^[5]: 索力最大的斜拉索作用点 (C15 ~ C12) 的误差最小。通过反复试算, 当惯矩等于 10 m^4 时, 计算结果如图 5 所示。由图 5 可以看出, 桥博模型经调整后的桥塔各索力作用点位移, 与 ANSYS 模型计算结果更为接近, 且在拉索索力最大的 C15 ~ C12 索索力作用点附近最为接近。

ANSYS 建模中加上主跨部分, 不考虑配重箱上横隔板的质量和配重砣的质量, 考虑结构自重、主梁上横隔板自重和二期恒载的作用; 桥博建模中, 按照调整后的圆弧倒角部分进行计算。计算时为了只比较两者的刚度, 在一个施工阶段, 安装所有构件, 一次性加上最后一次调索的初始索力, 二期恒载一次性施加, 桥博计算塔顶沿 X 轴正向的位移为 11 cm。把桥博建模中计算得出的成桥最终索力, 按集中力的方式加在 ANSYS 模型中, 由 ANSYS 计算得塔顶 X 正向位移 11.2 cm, 误差百分比只有 1.8%, 应该算是取得了较好的近似效果。

5 结语

通过比较分析, 可以得到如下观点, 等效刚度法不适合等效截面渐变率较大的桥塔, 而调整桥塔刚度时, 抗弯刚度的影响大于轴向刚度的影响, 本桥塔经过调整, 使得桥博与 ANSYS 计算的结果接近, 刚度模拟比较准确, 可以进行进一步的施工仿真分析, 并在实际工程应用中也取得了较好的效果。然而本桥塔的刚度模拟也非绝对吻合, 如果利用迭代法逐个调整桥塔单元的刚度可能会得到更好的仿真效果, 但工作量很大, 至于效果有待于进一步的探索和实践。

参 考 文 献

- [1] 李欣. 轨道交通无背索斜拉桥受力分析与施工监控[D]. 上海: 同济大学土木学院, 2007.
- [2] 施新欣. 无背索斜拉桥结构性能研究[D]. 上海: 同济大学土木学院, 2005.
- [3] Walter Podolny, John B Scalzi. Construction and Design of Cable-Stayed Bridges[M]. New York: John Wiley and Sons inc, 1986.
- [4] 李欣, 石雪飞, 阮欣. 伊通河无背索斜拉桥的施工控制[J]. 结构工程师, 2007(增刊): 774-779.
- [5] 李小祥, 石雪飞, 李欣, 等. 长春轻轨工程无背索斜拉桥施工仿真[C]//全国桥梁学术会议论文集. 北京: 人民交通出版社, 2007: 772-776.

Stiffness Simulation of Irregular Shaped Pylon of Cable-Stayed Bridge Without Back-stays

Wu Xun¹, Wang Yiqiao¹, Li Xin^{1,2}

(1. Department of Bridge Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Architecture Design and Research Institute of Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: For cable-stayed bridge with fixed pylon and beam, the stiffness ratio between pylon and beam will directly affect the distribution ratio of load, whereas, if the pylon is tilted and without back-stays, the determination of the stiffness ratio will be more difficult and important. In this paper, the author sums up the approaches used in the construction simulation of Yitong River cable-stayed bridge, proposing a view: of simulating the real stiffness of the system by adjusting the bending stiffness of truss model, hoping to provide reference for similar projects.

Key words: cable-stayed bridge without back-stays; irregular shaped pylon; construction monitoring and controlling; stiffness simulation

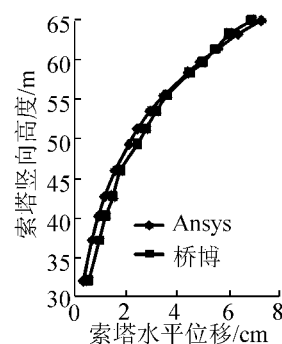


图 5 惯矩 = 10 m^4 时
位移比较图