

基于弹性—刚性支撑法的钢拱架预抬高值确定

袁鹏, 刘建

(长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

摘要: 钢拱架现浇主拱圈施工法是山区大跨径拱桥常用施工方法, 施工控制的核心为拱圈现浇安全及拱圈线形, 而钢拱架是保证拱肋安全和线形的重要结构, 其预抬高值不仅关系到钢拱架的顺利合龙, 也关系到主拱圈的成桥线形能否满足设计要求。文中提出基于弹性—刚性支撑法的钢拱架吊装预抬高值确定方法并应用于实际工程中, 结果表明该方法能保证施工安全和精度。

关键词: 桥梁; 钢拱架; 预抬高值; 裸拱线形; 弹性—刚性支撑法

中图分类号: U448.22

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)06-0113-03

对于钢拱架预拱度, 张立永等提出了预抬高值迭代算法, 通过对砼浇筑过程和吊装过程进行多次迭代得到预抬高值。但该方法需对预拱度进行不断调整, 直到其满足精度要求, 会耗费大量时间和精力。为简化反复迭代的过程, 针对缆索吊装中索力和线形控制提出了零弯矩法、定长扣索法、弹性—刚性支撑法等方法。零弯矩法通过使拱肋各节段接头处的弯矩为零计算拱肋各安装节段各根扣索的索力, 该方法概念清晰, 计算精度高。但一些工程因斜拉扣挂系统的扣塔位置、塔高和拱肋上扣点的位置等因素, 应用零弯矩法计算的扣索索力会出现负值和不均衡的情况。因此, 该方法具有一定的适用范围。定长扣索法是指扣索张拉到某个控制状态后, 在后续拱肋节段安装中不再调整扣索索力, 而通过预先设置预抬高量, 利用扣索索力增量引起的弹性伸长实现节段标高调整。该方法需将索力作为一个外力作用在拱桁架上, 通过控制索力控制拱肋的标高, 而钢拱架比拱肋轻, 施工过程中不需对索力进行调整。因此, 这种方法不适用于钢拱架吊装。弹性—刚性支撑法是一种基于一次张拉到位控制思想的控制参数求解方法, 其主要特点是在计算索力的同时给出拱架的预抬高量, 与实际钢拱架吊装过程相符, 适用于钢拱架吊装过程计算。该文以务川洋冈河大桥

为例, 基于弹性—刚性支撑法确定钢拱架预抬高值。

1 弹性—刚性支撑法

弹性—刚性支撑法的主要思路是将当前吊装节段的扣索模拟为刚性支撑, 而将已施工节段的扣索模拟为弹性支撑, 利用有限元分析软件进行施工过程模拟, 得到各节段每根扣索的初始张拉索力和索力增量, 初始张拉索力和各阶段索力增量之和即为拱架合龙后的最终索力, 各施工阶段相应节段竖向位移累积之和即为拱肋吊装预抬高量。在砼浇筑阶段, 由于腹板和顶板是在底板浇筑完成后浇筑, 此时底板砼已具有一定的强度, 能和拱架形成联合作用一起承受腹板和顶板的重量, 拱架变形量很小, 可不予以考虑。也就是说, 只需求解底板浇筑时拱架的下挠值。

2 工程概况

务川洋冈河大桥桥跨布置为 16 m 普通钢筋砼空心板+120 m 钢筋砼箱形拱+16 m 普通钢筋砼空心板。净跨径 120 m 钢筋砼箱形拱桥的净矢跨比为 1/6, 拱轴线为悬链线, 拱轴系数为 1.756。拱箱截面高度为 2.2 m, 宽度为 8.3 m, 单箱双室截面。全桥立面布置见图 1。

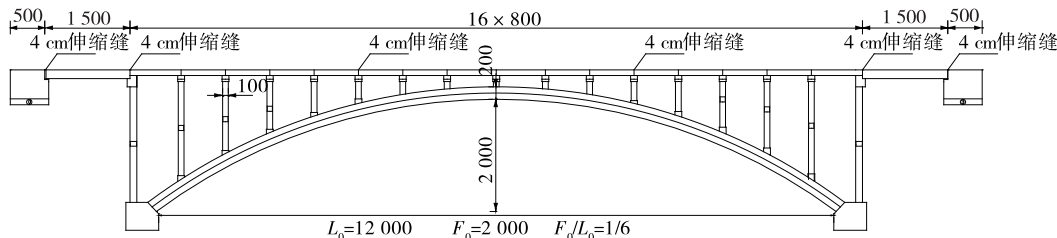


图 1 务川洋冈河大桥立面布置(单位: cm)

钢拱架主要由标准节段、拱脚节段、连接构件及合龙段组成,横向系用横联和平联连接。在主拱圈下拼装圆弧形钢拱架,沿顺桥向在拱圈下拼装类圆弧形钢拱架,沿弧向共用2联拱脚节段、18联标准节段和1联拱顶合龙段,每联基本节段横向为4组8片。节段之间上弦采用法兰钢板螺栓连接,下弦采用阴阳接头铰接。钢拱架为矩形结构,下弦采用销接,上弦通过楔形连接结构调节栓接各节段钢拱架,保证节段拼装后按照箱拱圆弧方向变化,最终形成弧形拱架。钢端桁架连接第一节段钢拱架与拱脚,在拱脚节段设铰,保证在拱架拼装成型并卸掉扣索后形成两铰拱,使在拼装过程中产生的附加应力重新分布,有利于临时拱圈受力。拆除临时拱圈的扣索后再封闭拱脚的铰,焊接连接型钢,使之转换为无铰拱。临时拱圈形成后,在钢拱架上搭设钢管架,安装调节顶托,在顶托上铺设分配梁、方木、模板,浇筑砼。吊装施工见图2。

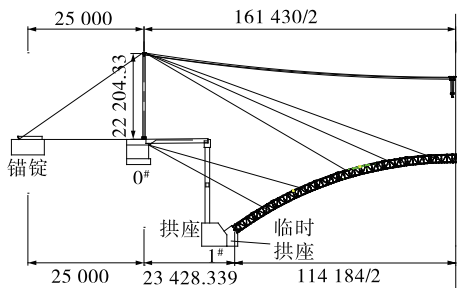


图2 吊装施工示意图(单位:mm)

3 砼浇筑过程分析

采用MIDAS/Civil有限元软件模拟主拱圈砼浇筑过程。

3.1 建立砼浇筑过程模型

先通过MIDAS/Civil建立钢拱架模型。钢拱架为空间结构,构造较复杂,横向有4组8片拱架,由于砼是横向均匀浇筑,不需考虑荷载横向分布的影响,故将其简化为1组2片拱架进行有限元分析。拱架采用梁单元建立,在钢拱架拆除扣索后对钢拱架的临时铰接进行固结,使钢拱架由两铰拱结构体系转变为无铰拱体系。为此,将边界条件设置为固结,拱架各节段下弦节点的连接方式为铰接,有限元模型采用铰接连接的处理方式,释放连接节点的弯矩,拱架其余节点均采用固结。对于荷载,将底板湿重简化为单元分布荷载施加在拱架单元上。砼浇筑钢拱架模型见图3。



图3 砼浇筑钢拱架模型

3.2 分析结果

图4为通过砼浇筑钢拱架模型计算得到的位移等值线图。



图4 拱架位移等值线图(单位:m)

3.3 目标线形求解

选取每片拱架的前端作为控制点,将设计线形值加上当前所求模型下挠值得到第一阶段吊装过程所需达到的目标线形。由于拱架为对称结构,选取拱架的一半进行分析,同时参考类似拱桥预压试验的非弹性变形数值,得到表1所示第一阶段需达到的目标线形。

表1 拱架目标线形

控制节段	设计线形	预抬量	控制线形
1	551.690	0.004	551.694
2	554.835	0.007	554.842
3	557.642	0.012	557.654
4	560.070	0.019	560.089
5	562.196	0.027	562.223
6	563.920	0.037	563.957
7	565.242	0.047	565.289
8	566.254	0.054	566.308
9	566.866	0.059	566.925
10	567.069	0.061	567.130

4 拱架吊装过程分析

采用弹性—刚性支撑法进行拱架吊装过程分析。该方法是基于一次张拉到位控制思想的控制参数求解方法,只需对吊装过程进行一次分析计算。在拱架吊装过程中,拱脚处为铰接。第一个拱肋节段吊装就位后,扣点处的约束条件为刚性定向支撑,支撑反力即为此时的扣索索力 T_{11} ,端头处的拱架预抬量为 Δ_{11} ;第二个吊装节段到位后,第二个节段

的扣点边界条件模拟为刚性支撑,第一个节段的扣点边界条件由刚性支撑变为弹性定向支撑,弹簧沿扣索方向的刚度系数为 EA_1/l_1 。则第 n 个节段吊装结束后第 i 段拱架的预抬量为:

$$\Delta_i = \Delta_{ii} + \sum_{j=i+1}^n \Delta_{ij} \tag{1}$$

式中: Δ_{ij} 为第 i 个节段的拱架端头因为吊装第 j 个节段产生的位移。

4.1 建立拱架吊装过程模型

基于弹性-刚性支撑法对拱架吊装过程建立有限元模型,拱架采用梁单元,扣索采用桁架单元,拱架处边界条件为铰接。先对每片拱架分别建立结构组,对扣点节点采用沿扣索方向的局部坐标,分别建立固结和弹性连接的边界组。然后建立施工阶段,

在吊装当前拱架时激活固结边界组,在吊装下一节段时将固结边界条件钝化,激活弹性支撑边界组,进行施工阶段边界条件的激活和钝化。钢拱架吊装模型见图 5。

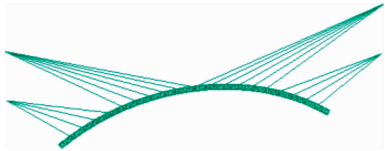


图 5 钢拱架吊装模型

4.2 分析结果

通过钢拱架吊装模型进行施工阶段分析,得到表 2 所示各施工阶段的下挠值。

通过表 2,得到吊装过程各施工阶段各节段的累

表 2 拱架吊装过程理论下挠值

cm

施工阶段	各节段下挠值									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CS1	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS2	-0.09	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS3	-0.12	-0.08	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS4	-0.13	-0.12	-0.18	-0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS5	-0.14	-0.14	-0.25	-0.17	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CS6	-0.14	-0.16	-0.29	-0.28	-0.33	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
CS7	-0.15	-0.18	-0.32	-0.33	-0.39	-0.20	-0.08	0.00	0.00	0.00
CS8	-0.16	-0.20	-0.33	-0.37	-0.45	-0.31	-0.31	-0.11	0.00	0.00
CS9	-0.16	-0.22	-0.35	-0.40	-0.49	-0.38	-0.48	-0.36	-0.14	0.00
CS10	-0.17	-0.23	-0.37	-0.44	-0.52	-0.44	-0.59	-0.55	-0.48	-0.19
合龙	-0.17	-0.24	-0.38	-0.45	-0.53	-0.46	-0.65	-0.68	-0.76	-0.60
合计	-1.45	-1.60	-2.51	-2.52	-2.75	-1.83	-2.10	-1.69	-1.39	-0.79

积位移。将砼浇筑过程的目标线形作为吊装阶段的设计线形,得到表 3 所示吊装过程的控制线形。

表 3 拱架吊装目标线形

m

控制节段	设计线形	预抬量 Δ_{ij}	控制线形
1	551.694	0.014	551.708
2	554.842	0.016	554.858
3	557.654	0.025	557.679
4	560.089	0.025	560.114
5	562.223	0.027	562.250
6	563.957	0.018	563.975
7	565.289	0.021	565.310
8	566.308	0.017	566.325
9	566.925	0.014	566.939
10	567.130	0.008	567.138

4.3 实际工程结果对比

将吊装过程和砼浇筑过程模拟计算得到的理论控制线形标高运用到实际施工中,拱架吊装和底板砼浇筑后测得的实际标高与设计线形标高对比见表 4。从中可见,实际拱架位置和设计线形基本吻合,

表 4 拱架实际标高和设计标高对比

m

节段	设计标高	实际标高	节段	设计标高	实际标高
1	551.690	551.683	6	563.920	563.914
2	554.835	554.842	7	565.242	565.231
3	557.642	557.663	8	566.254	566.251
4	560.070	560.081	9	566.866	566.859
5	562.196	562.193	10	567.069	567.063

移响应无明显变化规律,桥梁位移响应的强振频率基本没有变化。

由图 5 可知:桥梁抖振的强振频率主要集中在低频区,说明脉动风的频率成分和桥梁结构的自振频率基本处于同样的区域才对结构响应不明显。

3.4 舒适度评估

根据抖振响应计算最大双悬臂施工时抖振对施工人员的影响,Diekemann 指标计算结果见表 5。

表 5 最大悬臂施工状态下悬臂端 K 值

阻尼工况	风攻角/(°)	K	
		横向	竖向
工况 1	-3	1.08	4.27
	0	1.00	2.87
	3	1.04	1.37
工况 2	-3	0.64	4.92
	0	0.72	2.29
	3	0.96	1.28

由表 5 可知:不同工况下,最大双悬臂施工状态横向 K 均在 1 左右,竖向 K 均在 10 以内,最大双悬臂施工状态下横向、竖向舒适度处于能忍受较长时间振动的区域,对施工人员和机械的影响不明显,施工人员和机械可承受较长时间的工作。

4 结论

(1) 刚构桥在成桥阶段与施工阶段的一阶模态分别为侧向水平横摆、竖向弯曲振型,且两者振动频率较低,需将最大双悬臂施工状态作为高墩刚构桥抗风设计重点。

(上接第 115 页)

最大偏差在允许范围内。

5 结论

该文针对主跨为 120 m 的上承式钢筋砼拱桥,运用 MIDAS/Civil 对缆索吊装过程和钢拱架上现浇主拱圈底板砼过程进行仿真模拟,结论如下:

(1) 基于弹性—刚性支撑法,利用 MIDAS/Civil 进行缆索吊装过程分析求得吊装过程的预抬高值,能一次性得到吊装过程中的节段位移量,避免反复迭代过程,同时能满足精度要求。

(2) 将主拱圈底板浇筑过程的设计标高加上底板浇筑的预台量值作为缆索吊装主拱圈过程的设计

(2) 在不同风攻角、不同结构阻尼影响下,高墩刚构桥的抖振响应规律不同,在高墩刚构桥抗风研究中需在风荷载作用下开展多因素工况分析,以进行安全的抗风设计。

(3) 该桥脉动风的分布频率与桥梁抖振的强振频率均处于低频区,舒适度 Diekmann 指标值计算结果较小,在最大双悬臂施工状态下施工环境处于能忍受的长时间振动中,对施工人员的舒适度与安全性影响不大。

参考文献:

- [1] 张永辰,祝建波,张丽芳.高墩大跨连续刚构桥设计控制参数优化研究[J].公路与汽运,2018(2).
- [2] 李莱.风环境下高墩大跨连续刚构桥的行车安全性分析[D].长沙:长沙理工大学,2016.
- [3] 陈艾荣,项海帆.悬臂施工中的刚构桥梁的风荷载计算方法[J].公路,1998(3).
- [4] 陈艾荣,项海帆.大跨刚构桥梁气动弹性试验及分析[J].振动工程学报,1999,12(4).
- [5] 王进军,李杰.桥上行人对车桥振动的可容忍性(或舒适度)的判断[J].铁道建筑,2003(7).
- [6] JTG/T D60—01—2004,公路桥梁抗风设计规范[S].
- [7] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室.杭州下沙大桥抗风试验研究[R].上海:同济大学,2000.
- [8] 曹映泓.大跨度桥梁非线性颤振和抖振时程分析[D].上海:同济大学,1999.
- [9] 王文中,刘刚亮,顾金钧.虎门大桥辅航道桥悬臂施工阶段风致抖振的控制[J].桥梁建设,2002(5).

收稿日期:2018—04—10

标高,将该设计标高加上缆索吊装过程中的预抬高值即得到吊装过程的控制标高。

参考文献:

- [1] 张立永,程俊,杨晶晶,等.钢拱架裸拱线形及预抬高值迭代算法研究[J].公路交通技术,2014(3).
- [2] 张玉平,李传习,董创文.“零弯矩法”应用于斜拉扣挂索力确定的讨论[J].长沙交通学院学报,2004,20(1).
- [3] 田仲初.大跨度钢箱拱桥的施工控制关键技术与动力特性研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [4] 张静静,张玉平,李传习,等.基于拱架—拱圈联合作用的钢拱架应力分析[J].公路与汽运,2016(5).

收稿日期:2018—02—06