

东莞鸿福路特大桥的几个关键控制点

惠 斌

(北京市市政工程设计研究总院 北京 100045)

摘 要: 本文就东莞鸿福路特大桥及主体结构做了简述, 文章分析了设计与施工的几处关键控制点, 提出了柔性桥梁桥面系一次性吊装标高的准确控制方法, 即“螺距控制法”, 重点强调桥梁设计必须与施工紧密结合, 便于与桥梁界同行交流桥梁工程设计与实际施工配合的经验、推广新型桥梁结构、提高桥梁设计水平。

关键词: 新型结构 系杆张拉 螺距控制法 泵送灌注

1. 前言

1.1 桥梁概况

鸿福路跨河桥为飞架在东莞鸿福路景观大道上的一座特大型景观桥梁, 主桥为125m+125m下承式钢管混凝土刚架系杆拱结构, 东、西两侧引桥分别为4x35m和5x35m预应力混凝土连续箱梁。主桥自西向东连续跨越厚街水道巡河路、厚街水道(河道宽75m)、河畔观景公园、东莞运河(河道宽56m)及运河巡河路。

鸿福路特大桥具有整体现代的流线形、和谐的比例、细部的刻画造型以及与周边环境的协调呼应。剪彩通车后, 其优美的造型与周边的河畔观景公园、体育场及文艺舞台相融合, 已成为了东莞新城的标志性景观建筑(见图1)。



图1 大桥倩影

1.2 结构体系介绍

1.2.1 结构体系

该桥为无推力或少推力下承式钢管混凝土刚架系杆拱桥, 由桥墩、钢管混凝土拱肋及系杆等主要构件组成主体结构。结构采用哑铃型钢管做为拱肋断面, 钢管拱横桥向设置了五道横撑, 跨中为米字形、两侧为K字形钢管。拱墩

为刚结, 采用预应力体外预应力束做柔性系杆, 承担静载及部分活载产生的拱脚推力。系杆独立于桥面系。桥面系是由刚性横梁、纵梁和桥面板组成的飘浮体系, 纵梁主要起联结作用, 刚性横梁和桥面板承担桥面局部荷载, 桥面系本身不参与桥梁的主体受力, 而是通过吊杆将桥面荷载传递给主体结构(见图2)。

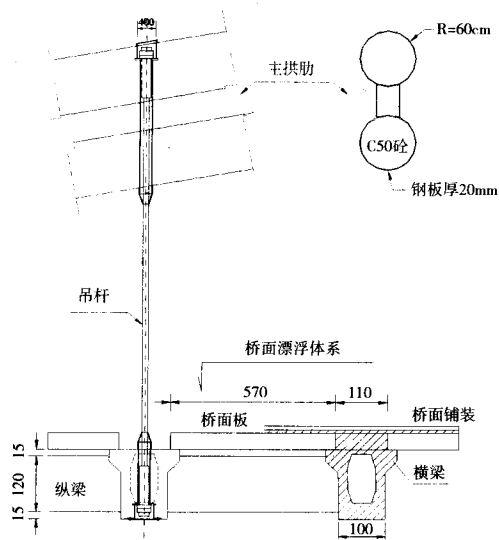


图2 结构体系(主体结构和飘浮体系)

1.2.2 结构数据

鸿福桥钢管混凝土刚架系杆拱为跨径 $2 \times 125\text{m}$ ，矢跨比为 $1/5$ ，拱轴线为 $m=1.1$ 的悬链线，桥面活载不计冲击力时计算挠度的最大绝对值小于 $L/800$ 。全桥系杆采用高强低松弛钢绞线成品索，单片拱肋设置8根，全桥共设32根系杆。吊杆采用高强钢丝成品索，其间距6.8米，单跨单片拱肋设置17根，全桥共设68根吊杆和34根横梁。拱肋间距为25米，车行道宽度23米，桥梁横断面全宽32米，为国内同类型桥梁桥面宽度之最。

1.3 理论设计与施工实施的差异

在全部桥梁的施工过程中，影响桥梁结构安全、主拱肋线形及竣工时桥面标高的因素有很多，如何将一个刚柔结合、结构复杂的理论设计转换成一座较完美的实际工程成品，其桥梁施工过程的控制尤为重要。我们在配合施工时针对几个关键控制点进行了具体分析和认真研究，成功地完成了本桥主体结构钢管拱肋的合拢、系杆张拉的控制以及拱肋泵送灌注（以下简称压注）混凝土，并提出了吊杆张拉的“螺距控制法”，最终做到了刚性横梁连续逐根一次吊装成功，从横梁吊装到桥面系的形成，没有进行二次张拉调整标高。下面将详细分析桥梁实施过程的几个关键控制点。

2. 主客观因素对结构施工控制的影响

施工过程中存在着地质岩层的不均匀性、不定的天气变化、建筑材料特性差异、施工工期及操作方式等主客观因素的影响，另外，刚架系杆拱结构本身又是复杂的超静定体系，这些因素不可能都完全真实地反映到计算模型中，在进行有限元程序分析时，采用简化的模型、模拟的边界条件，理论设计的边界假设与施工实施情况必然有所差异。本桥配合施工时结合地质、气候及人为因素等的影响，认真分析应力和位移的监测结果与设计差异的原因，对后期施工标高的控制等起了十分重要的作用。

2.1 自然条件对结构施工控制的影响

2.1.1 地质资料与现实情况的差异对结构控

制的影响

桥墩基础覆盖面积较大，地质岩层成坡状、深度不均匀分布，这都会造成原本对称的桥墩之间受力不均衡，反映到相同施工阶段，其实测位移、应力就有着一定的差异，需结合地质及日照等其他因素综合分析。在本桥拆除临时支架阶段，夜间无日照影响时，东边墩南北两侧水平位移差较小，而下午地质与日照因素影响一致时造成了较大的位移差。

2.1.2 日照、温差对结构控制的影响

鸿福路特大桥钢管拱结构的拱肋合拢期处于4、5月份，日温差大，温差和日光直射面的偏差对施工期间钢结构监测监控的影响较大。例如在第一次系杆张拉时，张拉前后时间相差3~4小时，期间钢管表面温差达 20°C 以上，仅此因素影响的桥墩墩顶位移达 1cm 左右，另有日照拱肋面的偏差，加上地质条件的影响，使得桥墩横向左右两侧水平位移差也在 8mm 左右，然而一次张拉系杆对墩顶造成的位移尚未达到 1cm ，因此对桥墩的位移、应力监测仅供用于分析误差原因，为调整南北拱肋压注顺序、局部钢束的张拉顺序等做参考，也为后续阶段桥面标高的确定提供基础资料。

2.2 人为因素对结构施工控制的影响

除了地质、温度等自然因素影响外，存在施工精度、焊接技术、施工工期安排和人员操作等对结构施工控制的影响也较大。

2.2.1 钢管加工精度对结构的影响。

钢管加工精度对结构合拢有较大的影响，依靠外力条件强行合拢会造成拱肋线形与原设计有所出入，拱肋形成不合理的内力状态，引起临时支架受力不合理，对后续施工会产生更大的影响。

2.2.2 焊接对结构的影响。

焊接可引起局部变形，焊接产生的高温也将形成钢板局部应力集中的现象，且当焊点在应变片附近时更可能造成应力监测异常，严重影响监控工作的正常进行。在本桥施工监测过程中，曾经发现几个应力监控点的监测数据，

在尚未拆除支架时,拱肋钢板就出现了100MPa拉应力的现象,届时所测数据无法正常使用。

此外,结构焊缝越多,越容易产生残余变形,这是种塑性变形,会体现在拆除支架时,拱肋挠度量明显大于计算值,在设计中应作出预留量,这也是在控制桥面系标高中,所应扣除的重要预留数据之一,在第五章螺距控制法的要点中有详述。

总之,设计中应尽量避免焊缝过于集中,不同部位的焊缝形式应选择合理,并非采用全熔透的焊缝效果就最好。施工监测设置的应变片要避开相应焊点,否则测点数据对监控会失去意义。

2.2.3 其他施工操作对结构的影响。

正确的施工操作和施工步骤对拱桥的结构受力和变形都十分重要,尤其是在拱桥的拱肋混凝土压注和系杆张拉时,这些在第三、四章分别都有相应详细的论述。

3. 预应力体外束系杆的张拉控制

系杆是本桥结构体系的重要部分,从防腐和耐久性考虑,系杆采用了高强低松弛环氧涂层钢绞线成品索,内注油脂且含内外两层HDPE护套。钢绞线标准强度为 $R_y^b = 1860\text{MPa}$,设计允许应力取 $0.52R_y^b$,可调索系杆采用OVMXG.T15-31可换索式锚具。预应力体外束系杆的张拉控制是本桥建设成败的关键,下面就本桥对系杆张拉的控制实情分项论述。

3.1 确定系杆逐根一次性张拉到位

相同断面的预应力钢束常会由于张拉先后顺序的原因,后张钢束对先张钢束产生一定的压缩影响,通常采用二次张拉作调整。根据本桥特点,在施工阶段采用墩间相对位移调整法,消除了钢束间的相互影响,并在设计中采取了系杆一次张拉到位。给施工提供了很大的便利。本桥设计上是通过张拉力、伸长量和墩柱水平位移三个基本数据来控制系杆张拉的。由于基础刚度大,张拉一根系杆边墩墩顶位移不足1cm,并且在不同施工阶段,不同的张拉时间产生位移均不同,在前述地质与天气因素

影响中已有相关论述,在实际施工中以张拉力和伸长量控制为主。

3.2 体外束系杆张拉力的控制

本桥单片拱肋有4种类型8根系杆,全桥共32根,设计系杆永存拉力 N_j 为4250kN。设计通过整体计算得出各张拉阶段的张拉力 N_j ,施工中由边墩拱脚单端张拉系杆,忽略系杆支架的影响,认为系杆的控制张拉力为 $N_k = N_j + A\sigma_{s1}$,公式中A的为系杆截面积、 σ_{s1} 为系杆在通过拱脚内空间曲线管道时与管道壁摩擦造成的预应力损失。图3为边墩系杆锚固侧立面图。

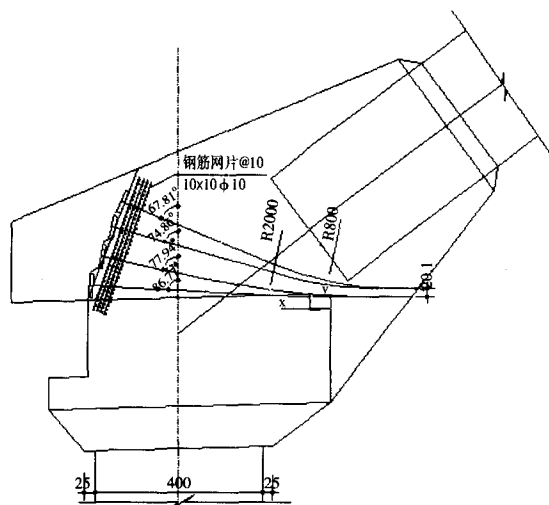


图3 边墩系杆锚固侧立面图

依据《公桥规》第5.2.6条公式

$$\sigma_{s1} = \sigma_k [1 - e^{-(\mu\theta + kx)}]$$

式中 σ_k - 张拉钢筋时锚下的控制应力;

μ - 预应力钢筋与管道的摩擦系数;

k - 管道每m局部偏差对摩擦的影响系数;

x - 从张拉端至计算截面的管道长度,以m计;

θ - 从张拉端至计算截面曲线管道部分切线的夹角之和,以弧度计(空间曲线应计竖直和水平两个面内的管道部分切线夹角之综合角度);

首根系杆张拉前由监控单位在中墩拱脚的系杆端部设置传感器,张拉过程中监测经过边墩拱脚管道预应力损失后的张拉力。分析检测结

果的平均值与设计按经验数据推算摩阻损失值比较非常接近,预先假定的值无需调整,可直接用于后期其他系杆的张拉控制。

3.3 系杆的伸长量

系杆的伸长量依据《公路桥涵施工技术规范》中公式

$$\Delta L = \frac{P_p L}{A_p E_p}$$

P_p - 预应力钢筋平均张拉力(N); L - 预应力钢筋长度(mm);

A_p - 预应力钢筋的截面积(mm^2); E_p - 预应力钢筋的弹性模量(N/mm^2);

显然, P_p 的计算取值是关键问题,系杆全长127.4m,边拱脚曲线管道长7.4m,中拱脚曲线管道长7m,外露系杆长113m,曲线管道长仅占系杆全长的11.28%,且为边墩单端张拉。根据预应力损失的规律我们简化计算,令 $P_p = N_j = 4250\text{kN}$,另外考虑了150kN的系杆松弛影响,经计算设计伸长量 $\Delta L = 68.3\text{cm}$ 。与实际张拉测量伸长量较为吻合。

3.4 系杆的张拉操作

新技术的发展体现出桥梁规范的滞后,笔者认为大吨位系杆的正确张拉操作,除了准确地控制张拉力和系杆伸长量以外,由于钢束数量较多,正确的钢束编号排序更是系杆张拉的关键点,也是最容易出现问题和被忽视的地方,很多施工队伍至今尚未认识到张拉排序的重要性。未进行钢束编号或排序出错,形成锚下钢束交叉,轻则局部应力突变加大,减少系杆使用寿命,重则造成现场断丝或成桥通车后发生断束直接关系到结构安全。

在本桥设计文件中,反复强调要求专业队伍进行系杆的张拉,但由于多方面原因未能如愿,施工张拉系杆时还是由于未进行钢束编号来穿束,出现了两次拉断系杆现象,此后才得到了施工队伍的高度重视。另外,在国内某桥通车两年后系杆突然断裂,最终查明也是系杆张拉未编序的结果。因此笔者总结,在今后的同类设计文件中,大吨位预应力钢绞线夹片式锚

具施工,必须强调张拉前进行编号穿束的步骤。

4. 拱腹箱压注混凝土的控制

在钢管拱肋安装合拢后,考虑到先纵向再横向的对称施工模式,分别对单片拱肋由四个拱脚同时向拱顶对称压注混凝土,而压注混凝土的顺序宜采用“先钢管后腹箱”。

4.1 钢管拱肋设计及压注混凝土的取材

钢管拱主要受力部位的主拱肋钢管及拱腹箱缀(腹)板材料取用Q345C钢,钢管拱肋断面高3.0m,圆管直径1.2m,钢管壁厚20mm,钢材屈服强度取用 $f_y = 345\text{MPa}$,抗拉极限强度及延伸率分别为550MPa和26%,弹性模量 $E_s = 2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ 。

拱肋混凝土的压注是形成拱体结构的关键,拱肋压注采用C50混凝土,为确保压注密实和施工方便,要求混凝土有一定的和易性,同时为减少钢管内混凝土游离水份,降低混凝土收缩对钢管套箍作用的负面影响,需控制钢管内混凝土的水灰比,在灌注混凝土时需加入适量微膨胀剂,根据钢管及腹箱承载的特点严格控制混凝土的膨胀率,钢管及腹箱混凝土分别采用0.25‰和0.15‰微膨胀率。另外通过采用预留孔道注浆的方式弥补混凝土收缩影响造成的间隙。

4.2 拱腹箱混凝土的压注是关键

对拱肋来说,压注混凝土的关键应该是钢腹箱的混凝土压注,由于压注钢腹箱混凝土时,腹箱内压较大,钢腹箱缀板常会出现局部变形甚至破坏,这在有关对某桥哑铃型钢管拱肋压注钢腹箱混凝土时,出现的钢管开裂事故研究中已被发现。钢腹箱中缀(腹)板与上下弦钢管焊接处应力最大,会远远超过钢材屈服强度。

本桥首次钢腹箱压注混凝土时,拱脚处有个别螺栓被拉断,钢腹箱中缀(腹)板局部出现向外变形,实测钢板局部应力曾经接近屈服强度达310MPa。压注结束后变形的钢腹箱中缀(腹)板基本复位,局部应力也降至100MPa

以内。

4.3 拱腹箱压注时出现问题的分析

对于本桥，拱腹箱压注出现问题的原因，经分析研究认为有以下几方面因素：

4.3.1 施工图依据拱肋局部压注进行有限元分析，设计时在拱脚段拱肋局部梅花形间距50cm布置螺栓拉杆，拱肋1/4~1/2段范围单排间距100cm布置螺栓拉杆（见图4），而拱脚段拱肋在工厂加工时，螺栓拉杆均按间距100cm设置的，我们发现此现象后，要求按施工图现场补装拉杆，但由于补装施工时，工人对关键部位尚重视不够，认为现有的厚钢板及螺栓已足够强大，现场补装的螺栓未拧紧螺母，造成了螺栓拉杆松紧不同。

4.3.2 压注时，混凝土搅拌车由于交通拥挤，受堵车影响，压注过程中断了半小时，使得压注混凝土出现不同程度的骨料沉积，造成通道堵塞，增大了拱脚处腹箱内的压力。

4.3.3 由于当时的压注混凝土测试踢落度偏小、压注输送管道过长，出现了局部管道堵塞，造成管道疏通与堵塞时输送压力变化较大，增加了间断性动压力，拱脚腹箱内压力峰值较高，使得拱脚处瞬间压力接近2MPa。

4.3.4 简化计算的压注混凝土需克服重力作用，当泵送接近尾声时，拱脚附近腹腔内液态混凝土的压强为 $P=hr=25 \times 20=500\text{KPa}$ ，而考虑到克服腹箱钢板与混凝土的摩阻力、吊杆导管和竖向肋板的阻力等，理想的腹腔压力在1MPa以内，远小于实际的2MPa。

4.3.5 进行有限元理论分析时，我们取1m段拱肋计算断面的受力和变形情况，在拱脚腹板加宽段梅花形50cm间距布置螺栓拉杆时，设计拱肋腹箱钢板及螺栓拉杆可以承受2MPa以上的压强，而螺栓拉杆按间距100cm布置，当腹腔压力在1MPa时钢板和拉杆就会达到抗拉极限，由此可以认为施工出现的问题属于正常现象。

4.4 总结设计施工的注意事项和措施

本桥除了设计中已经采取的措施外，通过对施工实情的分析总结认为，在今后的哑铃型

标准拱肋横断面图

拱脚拱肋横断面图

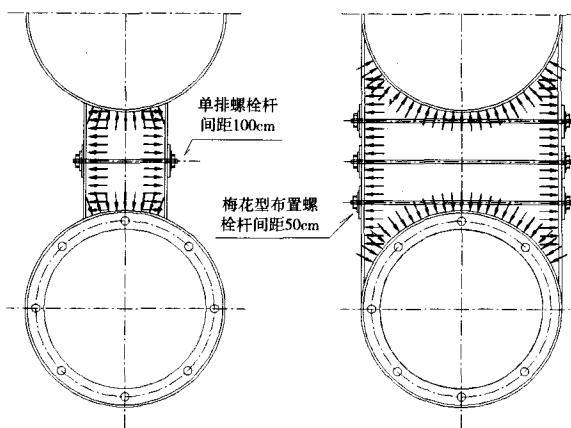


图4 腹箱螺栓拉杆

钢管拱设计施工中还应该注意的事项和采取的措施：

4.4.1 设计时注意钢腹箱腹宽应适当加大，吊杆的预埋导管直径尽量取下限，竖向加强钢板不宜过高，以达到增加钢腹箱内通透、减小压注混凝土摩擦阻力的目的。

4.4.2 钢腹箱设置螺栓拉杆对改善钢腹板的应力非常有效，根据具体钢管拱拱肋断面及压注的外在条件建立有限元模型，核算钢腹板变形及应力，计算钢腹箱中缀板螺栓拉杆的间距和直径是必要的。通常，螺栓拉杆间距不宜大于腹板高，并与其成反比，直径不小于22mm，如腹箱压强大于1.5MPa，必要时可以采用允许应力不小于800MPa的大直径高强度拉杆。

4.4.3 在压注混凝土施工时，从改善混凝土的配比做文章，对于混凝土的配比要求按照细骨料、流动性好、摩擦小、无收缩等原则做试验，有效地减小混凝土压注的摩擦阻力、延长混凝土的初凝时间。

4.4.4 压注混凝土的速度控制会严重影响摩擦阻力，严格控制压注速度，保证缓和、匀速进行压注，可避免间断性冲动、瞬间高压力的产生。

4.4.5 尽量减小输送管道长度和转角次数、回避转向角度过急，压注前用清水清洗，最好采用压稀浆润壁，以减小钢壁摩擦阻力，防止

由于压注时输送管道的堵塞而凝聚高压峰值，对钢腹箱钢板的冲击。

4.4.6 根据对东莞鸿福路大桥哑铃型钢管拱肋断面的结构分析，由于钢腹箱的位置原因，压注混凝土对增加断面刚度贡献较小，只是增加抗压面积，扣除增加自重影响，压注混凝土的意义不大，认为可以取消，但国内外同类结构尚未采用。笔者大胆建议在今后的设计中，认真分析、研究钢箱腹腔内压注混凝土存在的必要性，并采取相应结构及防腐方面的措施，取消钢箱腹腔的压注混凝土，简化施工工艺。

5. 桥面系吊装的标高控制

5.1 影响桥面系的标高控制的因素

影响桥面系标高控制的因素很多，有地质、气温、日照、材料、加工精度、施工操作、临时支架的刚度、监测精度等，在前面2~3部分都谈到了一些，但最终直接影响桥面系标高控制的重要阶段是桥面系横梁的吊装，即吊杆的张拉控制。

5.2 桥面系标高控制的常规方式

5.2.1 通常的控制方式

在同类桥梁施工中，一般是通过对每根横梁相应吊装阶段的有限元分析，确定“准确”的理论标高，通过测量控制每根横梁吊装时的阶段标高，来实现桥面系标高精度的控制。

5.2.2 高科技的有限元软件无法模拟多变的施工环境

现代的有限元手段固然先进，但由于实际施工过程中受各种客观因素影响较大，如工期、气温、日照、同步的施工荷载、测量因素（受荷载、周期、条件、精度影响）等，计算分析无法模拟复杂多变的边界条件，施工难以达到设计中每根横梁吊装工况的理想状态，比如在无施工的状态下，由于清晨与午后的日照温差不同，拱肋标高及墩顶水平位移变化均达到在1cm以上。因而使横梁的吊装标高施工控制复杂、精度低，既影响施工速度，又不得不在

全部横梁就位后整体重调标高以满足设计要求。特别是在横梁、纵梁、桥面板联结后，再整体重调标高难度更大，且直接影响结构受力、延误工期、增加施工工序与难度，既浪费人力物力，又影响施工质量。

5.2.3 吊杆张拉的螺距控制法

笔者就鸿福路大桥的实际施工过程，对各个环节关键点认真分析了理论计算与施工实情的差别，提出了“螺距控制法”，成功地做到了单根横梁吊装过程不测量标高，用螺距一次性控制，使逐根横梁吊杆连续快速张拉，全桥横梁一次吊装就位。测量结果显示，34根横梁标高最大误差8mm，从横梁吊装到桥面板联结不必再调整吊杆的张拉位置。桥面系形成后，全桥标高精度达到一厘米以内，对于跨径125米的半柔性桥梁精度完全能满足设计要求。极大地简化了施工工序，避免了桥面结构成型后复杂繁琐的整体张拉调整，最大程度地节省了工期。

5.2.4 螺距控制法的要点

1) 首先排除上弦管注压前由于基础、焊缝、支架等产生较大塑性变形的影响，以便于监测数据能更实际地反映出结构位移。

2) 通过将上弦钢管及钢腹箱压注混凝土和张拉系杆等过程的监测数据，与原计算模型的墩顶和拱顶位移加以比较，再调整基础刚度，经调整后的计算模型与实测变形情况吻合得很好。

3) 吊装横梁前确定螺距值，设计人员进行详尽的计算，其主要内容是：吊装前实测各吊杆处的拱肋锚垫板顶实际高程 H_s ，分别计算出成桥后（桥面系全部完成）各吊杆处拱顶计算位移量 A ，各吊杆成桥后的伸长量 B 。提供给厂家加工吊杆长 L_0 ，等于吊装后设计吊杆处拱肋锚垫板顶高与横梁下锚垫板底高 H_d 之差减去伸长量 B ，既 $L_0 = H_s - A - H_d - B$ 。设计图横梁底距下锚板底取300mm，为方便施工采用下端调节

螺母与锚杯端头的控制螺纹距 L_t 来控制,设计保证吊杆下锚头 $L_t = 160\text{mm}$ (见图5),上锚头采用反算实际长度事先锚固入位。横梁吊装时最后的定位操作非常简单,就是将调节螺母的下边缘到锚杯下边缘的距离控制为 16cm 即可,所有横梁吊装过程无需控制标高的测量。

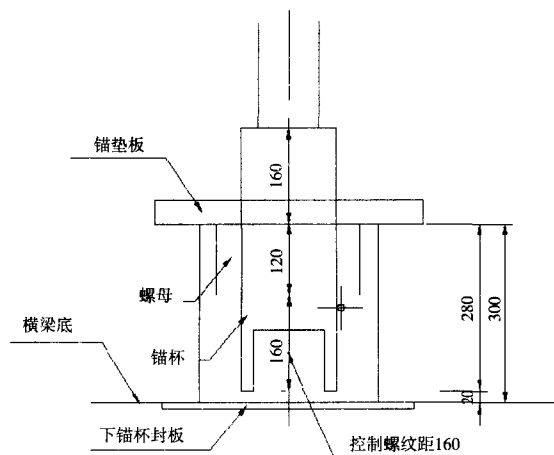


图5 控制螺纹距

5.2.5 横梁的吊装的要点

横梁吊装重量为 1200kN ,吊车操作较为困难,设计考虑提出了横梁吊装采用自提升方式,用刚性临时吊杆配合连续千斤顶,横梁吊装平衡控制操作方便。但本桥考虑节约成本,施工采用了普通千斤顶和临时爬索,临时索连接在吊杆下端锚头上,在第一根横梁吊装时横向平衡无法控制,操作困难。此后设计、施工研究安装了特殊横向限位装置,横梁吊装非常顺利,螺距控制法得以实施(见图6)。吊装操作时控制平衡、稳定的关键总结如下。

1) 大吨位吊装采用连续千斤顶自提升方式经济、方便、稳定。

2) 横梁两端吊装要对称同步、缓慢、匀速进行,横梁两端的高差不能超过 10cm 。

3) 临时吊杆最好采用刚性吊杆,如果采用柔性吊杆,在吊装过程中横向平衡的控制非常重要,在横梁顶导管处增加临时杆的有效约束很关键。



图6 横梁吊装实景图

6. 结束语

本文主要分析了设计与施工的几处关键控制点,重点强调桥梁工程理论设计不可偏离施工实情,桥梁设计为实际施工服务。鸿福路特大桥还有许多重要的技术问题需要总结和研究,如大直径嵌岩桩挖孔施工超前钻孔躲避不利地质夹层,桩身检测,拱脚处的局部受力分析和构造设计,吊杆、系杆更换的设计思路 and 施工方法,等等,由于篇幅所限就不再论述。

参考文献

- 1、陈宝春.钢管混凝土拱桥设计与施工.北京.人民交通出版社,1999;
- 2、徐升桥.丫髻沙大桥主桥设计.桥梁建设.2000(3);
- 3、秦容等.钢管混凝土拱桥钢管开裂事故分析.土木工程学报.2001.34(3);
- 4、惠斌等.东莞鸿福路钢管拱大桥.中国土木工程学会桥梁及结构工程第十六届全国桥梁学术会论文集,长沙,2004.北京:人民交通出版社.2004;
- 5、徐德标等.鸿福路大桥吊杆更换方案的确定与实施.城市道桥与防洪.2003年06期;