

大跨钢桁拱桥斜拉扣挂悬臂法施工技术

田唯^{1,2,3}, 由瑞凯¹, 周仁忠^{1,2,3}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 公路长大桥梁建设国家工程研究中心, 北京 100088;
3. 长大桥梁建设施工技术行业重点实验室, 湖北 武汉 430040)

摘要: 大跨钢桁架拱桥采用斜拉扣挂悬臂法施工, 其结构受力和施工工艺极其复杂, 施工难度大。针对国内采用斜拉扣挂悬臂法施工的主要大跨钢桁拱桥中的总体施工方案、体系转换工艺技术、线形控制技术、主桁拱和刚系杆合龙技术、斜拉扣挂系统施工技术进行总结、对比分析研究。得出针对不同情形的施工工艺和方法。

关键词: 大跨钢桁拱桥; 悬臂法; 斜拉扣挂系统; 线形控制; 合龙方法

中图分类号: U445 文献标志码: B 文章编号: 2095-7874(2016)08-0062-07

doi: 10.7640/zggwjs201608015

Construction technology of long-span steel truss arch bridge constructed by cantilever assembly method with cable inclined pulling and buckling system

TIAN Wei^{1,2,3}, YOU Rui-kai¹, ZHOU Ren-zhong^{1,2,3}

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China;

2. National Engineering Research Center of Highway Bridges, Beijing 100088, China;

3. Key Lab of Large-span Bridge Construction Technology, Ministry of Transport, Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: Cantilever assembly method with cable inclined pulling and buckling system is usually used for long-span truss arch bridge construction. The complex structural mechanical behaviors and construction technology bring difficulties to the bridge construction. The construction technologies which are applied on several domestic long-span steel truss arch bridges are summarized, compared and analyzed, such as general construction scheme, system transformation processes, geometry control methods, unstressed closure of arch and rigid tie bar, cable inclined pulling and buckling system erection, etc. We obtained construction technology and methods for different situations.

Key words: long-span steel truss arch bridge; cantilever assembly method; cable inclined pulling and buckling system; geometry control; closure method

0 引言

钢桁架拱桥相对于其他桥型具有外形雄伟壮观、跨越能力大、承载能力高等优点。90年代后期我国开始修建不少钢桁架系杆拱桥, 修建的方法包括支架法、缆索吊装法、大节段整体提升吊装及斜拉扣挂悬臂法等, 其中采用最多的是斜拉

扣挂悬臂法。如2005年建成的万州长江铁路大桥为(168+360+168)m三跨单拱连续钢桁梁桥, 采用由两岸向跨中架梁吊机悬拼, 中跨架设辅助以斜拉扣挂系统, 是我国首座采用斜拉扣挂悬臂法施工的大跨钢桁拱桥^[1]。2009年建成的南京大胜关长江大桥主桥为(108+192+336+336+192+108)m连续钢桁拱(如图1), 为世界最大跨径六线高速铁路钢桁拱桥, 中跨合龙创新采用“纵移+调索”技术, 解决了大悬臂状态下三主桁空间结构合龙的技术难题^[2-3]。2009年建成的朝天门大

收稿日期: 2016-01-05 修回日期: 2016-02-29

作者简介: 田唯(1980—), 男, 湖北武汉市人, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁工程建设及施工管理方面的研究。

E-mail: 70208513@qq.com

桥为(190+552+190)m三跨连续钢桁系杆拱桥(如图2),为世界第一大跨公路钢桁拱桥,主拱合龙创新采用预偏位移补偿+顶落梁法,避免大吨位整体移梁施工,刚性系杆合龙采用施加临时系杆法,减小了施工风险^[4]。2015年建成的珠海横

琴二桥为(100+400+100)m三跨连续钢桁系杆拱桥,刚性系杆合龙创新采用限位中支座法,不需架设临时系杆,无需顶推中支座而使刚性系杆顺利合龙^[6]。

我国在大跨钢桁架拱桥施工上已取得了丰富

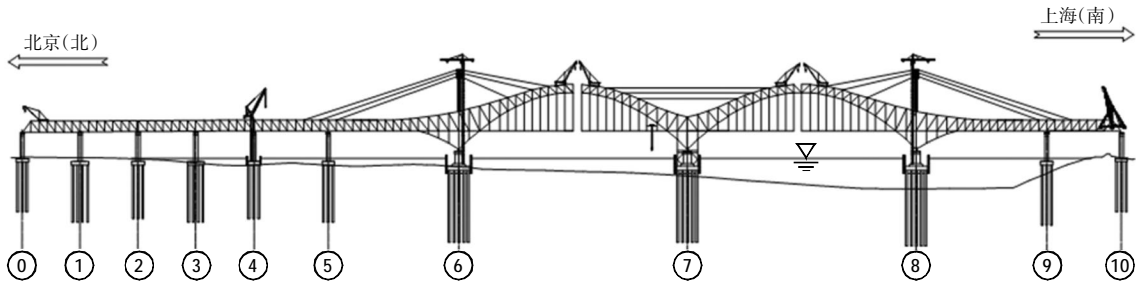


图1 大胜关长江大桥总体施工方案图

Fig. 1 General construction scheme for Dashengguan for Changjiang River Bridge

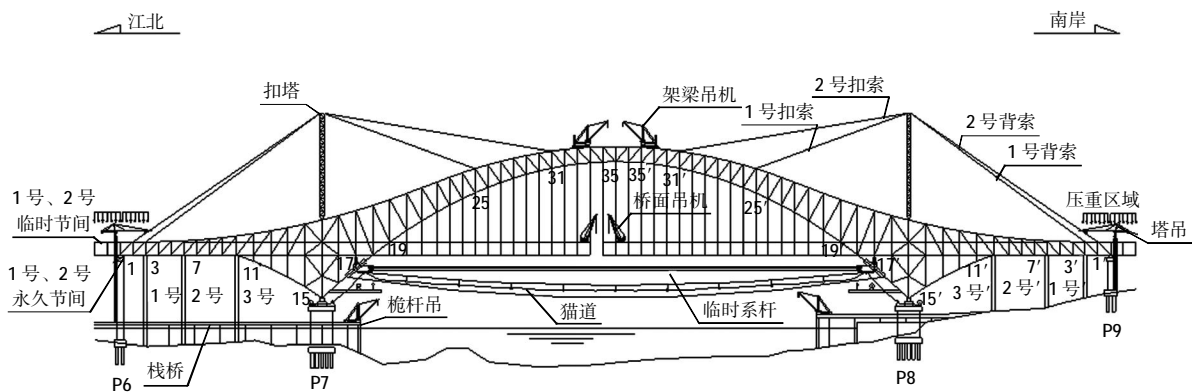


图2 朝天门长江大桥总体施工方案图

Fig. 2 General construction scheme for Chaotianmen Changjiang River Bridge

的经验和成果,施工技术也达到了世界领先水平,但至今还没有对大跨钢桁拱桥施工技术进行系统总结研究。大跨钢桁架拱桥结构和受力极其复杂,施工工艺繁多,不同具体结构施工方法上也有较大差异,迫切需要对此进行系统总结研究,为我国今后同类桥梁施工提供借鉴参考。本文以国内这几座主要的采用斜拉扣挂悬臂法施工的大跨钢桁拱桥施工为背景,就总体施工方案比选、关键工艺和体系转换、线形控制、主拱合龙、刚系杆合龙、斜拉扣挂系统施工等关键技术进行总结性探讨。

1 总体施工方案的选择

总体施工方案的优劣,决定着大桥能否顺利成功修建。针对现场桥位条件以及主桥结构形式

特点,对施工方案比选研究至关重要^[6]。以珠海横琴二桥为例:因横琴二桥主桥跨洪湾水道,航道等级为I级,通行3000吨级海轮,交通流量繁忙,因此支架施工法不可行;采用大节段吊装,主桁拱吊高高达120m,一般浮吊均难以满足要求,且采用大型浮吊作业,需对航道封航,难以实现;若采用缆索吊装法,则需建造庞大的塔架和复杂的缆索系统,现场作业区域难以满足,又因横琴二桥地处台风多发区域,大型缆索吊系统在台风期稳定安全性难以保证。针对横琴二桥为三跨连续钢桁拱桥,且为栓接结构,宜采用斜拉扣挂悬臂法施工,即采用架梁吊机爬行悬臂吊装架设杆件,中跨架设时再辅助以较轻巧的斜拉扣挂系统控制主桁拱内力。

大跨钢桁架拱桥采用斜拉扣挂悬臂架设法主要涉及两个问题：一是安装起点比选问题，二是主拱合龙方式问题。前者中又包括两种情况：一是以边支点为起点，由边跨往跨中安装，此方案一般各需两台架梁吊机，设备费用要高。对于三跨拱桥如万州长江大桥、朝天门长江大桥、珠海横琴二桥一般都从边跨往中间架设，在中间合龙。另一是由中支点往两边安装。对于多跨拱桥如大胜关长江大桥，为满足边中跨结构平衡受力需要，以及多作业面同时开展以节省工期需要，中间孔采用由中支点向两边同时吊装钢梁。后者也分为两种情况：一是拱梁并进，即中跨桁拱及刚系梁同步悬臂安装至跨中合龙，该法优点是桁拱和刚系梁同步合龙，可快速实现从大悬臂施工状态到主结构系杆拱受力体系转换，施工体系转换次数较少，施工工期较短，如大胜关长江大桥。二是先拱后梁即先悬臂安装桁拱至跨中，待桁拱合龙后，在中跨合适的位置安装临时系杆，形成系杆拱受力体系，再安装合龙中跨钢系杆。当跨径较大，悬臂安装力矩相对较大或桥位处风荷载较大导致拱梁并进稳定性较差的情况下，则采用此法，如朝天门长江大桥、珠海横琴二桥等。

2 关键工艺及其体系转换

大跨钢桁架拱桥采用斜拉扣挂悬臂施工，工艺复杂，体系转换繁多，在整个过程中随着钢梁架设，结构体系也在相应变化。以朝天门长江大桥为例，如上图2所示，其关键工艺和体系转换技术如下：

1) 桁拱从两侧边支点向跨中悬臂拼装，边跨钢桁梁安装设3个临时墩，边跨1号2号节间用1000t塔吊在膺架上安装。边跨其余节间采用架梁吊机悬臂拼装。为了明确结构受力，需采用顶升边支点方式逐步脱空临时墩。在边跨架设至3号临时墩时，脱空1号临时墩；边跨架设至主墩时，脱空2号临时墩；钢梁架至中跨10号节间时，脱空3号临时墩。边跨架设时，将边支点纵向约束，中支点纵向释放。结构体系由简支梁变为带伸臂的连续梁结构。

2) 中跨架设至大悬臂时，采用斜拉扣挂系统以控制主桁结构内力，此时要控制结构的倾覆安全性，需在边支点处进行压重，使得主桁抗倾覆系数满足 >1.3 的要求。中跨架设时，中支点纵向固定，边支点纵向约束释放，为带伸臂的简支梁

结构。

3) 主拱合龙后，在主拱南北E17之间架设临时系杆，为刚性系杆架设和合龙创造条件。此时结构体系为施工临时状态下的中跨局部带系杆拱的三跨连续梁受力体系。

4) 刚系杆架设及合龙过程中，为中部局部带临时系杆拱的三跨连续梁结构。刚性系杆合龙后，拆除临时系杆，全桥结构体系由中跨局部带临时系杆拱的三跨连续梁转化为中跨局部带永久系杆拱的三跨连续梁受力体系。

体系转换中，为对支点钢梁进行顶推、顶升调节，需在边中支点处布置相应顶推设备调节系统，该系统包括纵、横、竖向千斤顶调节装置。对于采用以中支点为起点安装方式，如大胜关长江大桥(图1)，主要不同之处是需在初始中支点安装时布置墩旁托架，在边跨合龙前，将墩旁托架和钢梁临时固结，6号(8号)墩墩旁架托在边跨钢梁合龙后解除与钢梁杆件的连接。7号墩墩旁托架在主拱架设前2个节间后对钢梁的中线、高程精确调整，再与钢梁间锁定，在中跨主拱合龙后再解除。

3 主桁拱线形控制

目前钢桁拱桥多采用栓焊结构形式，即杆件采用工厂焊接预制，再运输至现场吊装，高强螺栓栓接。其安装线形主要由工厂制造线形(杆件长度和角度)决定，而杆件长度和角度主要由制孔精度决定。对吊杆的无应力长度计算要充分实际中的荷载进行成桥计算得到成桥线形，以此为依据确定吊杆的无应力索长。另外工厂进行每次不少于3~4个主桁节间的短线滚动试拼装，以检验制造线形是否满足要求。

现场施工中主要是通过控制安装拱度和桥面轴线来控制安装线形。现场安装中主要采取如下技术：

1) 板缝控制：预拼及安装时均先上15%的工作螺栓，并一般拧紧，初步消除板缝，防止出现扭转现象。高栓施拧顺序为从节点中心向四周辐射进行，节点板缝主要靠高栓初拧消除，初拧扭矩为终拧扭矩的50%，初拧完成后立即检查板缝是否符合要求，不符合要求的应进行复拧。

2) 栓孔重合度控制：栓孔重合度主要靠构件预拼及安装时打入定位冲钉的直径和数量来保证。构件预拼和安装时，主桁节点按梅花形布置打入

60%~70%定位冲钉,连接系打入50%的定位冲钉,确保节点栓孔重合度满足要求,严格控制构件轴线。

3) 悬臂安装拱度控制:悬臂安装时按照从下至上,先下平面后立面,尽快形成三角形稳定结构,最后安装上平面的原则进行。为保证拼装拱度,节点连接冲钉打足后,安装15%工作螺栓,每安装至临时墩和主墩上墩前应让杆件前端处于悬臂状态,前端节点与墩顶之间保持2~5 cm间隙。主桁杆件闭合,高栓100%终拧后,再完成墩顶抄垫,安装下一个节间时支墩才开始受力。

4) 高栓施拧进度控制:主桁节点高栓终拧进度不得落后拼装部位2个节间,其他节点高栓终拧不得落后拼装进度3个节间。施工前应制订详细的高强螺栓施拧工艺,并进行工艺试验,每批高栓进场后,应对供应商提供的扭矩系数进行复验,确保施工施拧质量。

5) 轴线偏差控制:现场施工中由于支点高差及平面位置、构件安装顺序、不平衡荷载、节点板扭转、阳光偏晒等因素均会引起桥梁轴线偏差。现场安装时需尽量避免阳光偏晒等情况,并且每安装一节则进行线形测试评估,一旦线形偏差较大,则需采取优化高栓施拧顺序等措施及时进行纠偏,防止安装误差累积发散。

4 主桁拱合龙

大跨钢桁拱桥主拱合龙时,要使主拱合龙口顺利合龙,需确保合龙口两侧的竖杆相互平行,上下弦杆竖向位移差、纵向位移差满足合龙误差范围要求,为此调整合龙口方法有纵移调纵向误差、顶落梁调高程误差、调整索力以调整转角和高程误差等。对于三跨钢桁拱桥和多跨钢桁拱桥,其主桁拱合龙的方式和调整的方式有所不同。

1) 三跨钢桁拱桥主桁拱跨中合龙,如朝天门长江大桥,可采用预偏位移补偿+顶落梁法合龙。桁拱中跨合龙实际上是钢梁由悬臂外伸梁转换成三跨连续梁的过程,可采取通过改变边、中支点相对高差等措施,实现三跨连续梁跨中弯距、剪力和相对转角均为零的合龙条件。通过顶落梁调整高程和转角误差,同时钢梁向跨中纵移,调整合龙口纵向误差。顶落梁方式可分为3种:一是中支点不动边支点下降,如朝天门长江大桥和珠海横琴二桥,边支点分别预降2.3 m和0.9 m;二是中支点抬高边支点不动,如万州长江大桥;三

是中支点和边支点同时顶落。钢梁纵移在时机上可分为2种情况:一是钢梁合龙前时刻实测合龙口误差,据此进行整体纵移。由于主桁拱合龙时结构为大悬臂状态,还未形成稳定体系,进行整体移梁存在一定风险。二是钢梁初始架设时对钢梁采用预偏补偿所需调整的位移量,该方法要求前期计算至合龙工况,再进行倒拆分析至边跨钢梁架设初始时得出预偏量,如朝天门长江大桥,初始钢梁架设时即往跨中预偏了0.85 m,作为主桁拱跨中合龙时的位移补偿。同理珠海横琴二桥初始架设时往跨中预偏了1.62 m。通过采用预偏位移补偿,这两座桥在主桁拱合龙时均不需整体移梁操作,大大减小了施工风险。

2) 多跨钢桁拱桥合龙方法,如大胜关长江大桥,采用“纵移+调索”合龙法,其纵向误差调整主要靠钢梁纵向整体移动,高程和转角调整主要靠顶落梁加上扣挂系统索力调整。大胜关长江大桥合龙时在中跨和边跨共4处合龙口,合龙顺序为先边跨再中跨。边跨合龙时,6号(8号)墩按设计位置装好并临时锁定,4号(10号)墩顶钢梁下落560 mm,5号(9号)钢梁顶升110 mm,钢梁整体向6号(8号)墩纵移55 mm,消除两端转角和纵向位移误差。为使4号(10号)墩顶钢梁有下落空间,其墩顶支撑垫石先不浇筑,先安装临时支座。5号(9号)墩顶垫石先浇筑并安装正式支座。边跨合龙后,将4号(10号)钢梁顶起,浇筑支撑垫石并安装正式支座,5号(9号)墩落梁于正式支座。解除6号(8号)墩旁托架,并将钢梁向跨中整体纵移150 mm,为主跨合龙创造条件。主跨合龙时7号墩钢梁按设计位置安装,保持7号墩钢梁纵向位置不动,仅通过水平拉索调整合龙口位移和转角;6号(8号)墩钢梁通过纵向顶推支座调整合龙口纵向位移,合龙口竖向位移和转角通过调整斜拉扣挂系统索力来实现。

5 刚系杆合龙

大跨钢桁系杆拱桥通常设计为无推力拱,其推力靠柔性系杆和刚性主梁平衡,其中柔性系杆为体外柔性索(钢绞线或平行钢丝索),刚性主梁一方面起支撑桥面作用,另一方面起平衡推力作用,也称为刚系杆。刚系杆合龙主要有如下几种情况:

1) 采用拱梁并进方法施工,在主桁合龙后立即实施刚系杆合龙。在拱梁并进状态下,由于调

整主桁拱合龙口消除主桁合龙口误差，导致刚系杆合龙口存在误差，且通常此时刚系杆合龙口误差为负误差，即合龙口间距比理论间距小，需将刚系杆合龙口张开。可通过释放斜拉扣挂系统索力方法，外加刚系杆合龙口顶拉设施调整，万州长江大桥和大胜关长江大桥则采用此法。

2) 采用先拱后梁法施工，主拱合龙后，释放中支座纵向固定约束，随后在架设刚性系杆过程中，刚系杆合龙口逐渐加大，为减小合龙口误差，通常采用两种方法：施加临时系杆法和限位中支座法（顶推中支座法）。

①施加临时系杆法

如朝天门大桥，在主桁拱合龙后，如果直接架设刚性系杆，则随着跨中恒载加大，主墩反力座设置难度大，斜拉扣挂系统索力和主桁结构应力都超过容许值，通过在跨中适当位置之间架设临时系杆(如图 2 所示)，提前形成系杆拱体系平衡主桁拱的水平推力，为后续架设刚性系杆至合龙创造条件。

②限位中支座法

珠海横琴二桥在主拱合龙后，释放南中支座纵向活动约束，架设刚系杆至刚系杆合龙时，理论上仅需将南中支座纵向顶推 5 000 kN，即可实现刚系杆合龙。实际施工中，将南中支座设计为纵向位置可调节的装置(如图 3 所示)。该装置采用纵向设置若干个限位调节块，根据需要增减限位调节块数量，实现南中支座纵向位移量的调整。

该装置既考虑到主拱合龙时钢梁预偏量调整，又兼顾了刚系杆合龙时位移调整量。在刚系杆合龙前，通过增减限位调节块，将主墩支座限位在理论上刚系杆合龙时的主墩支座所处位置，则在刚性系杆合龙时，无需顶推中支座而使刚性系杆顺利合龙。

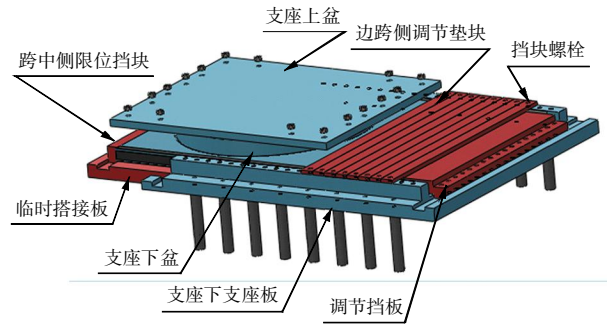


图 3 横琴二桥主墩支座结构形式图
Fig. 3 Structural form of main pier bearing of the second Hengqin Bridge

6 斜拉扣挂系统施工技术

1) 斜拉扣挂系统结构形式

斜拉扣挂系统一般由扣塔立柱、横向联系、扣索、锚索、锚箱组成。斜拉扣塔结构设计时主要考虑因素有扣塔的高度、扣锚索的布置形式、扣锚索的角度、最大控制力、扣锚索的张拉方法。图 4 为横琴二桥斜拉扣挂系统结构图。表 1 列出了国内主要的钢桁拱桥斜拉扣挂系统结构形式主要参数表。

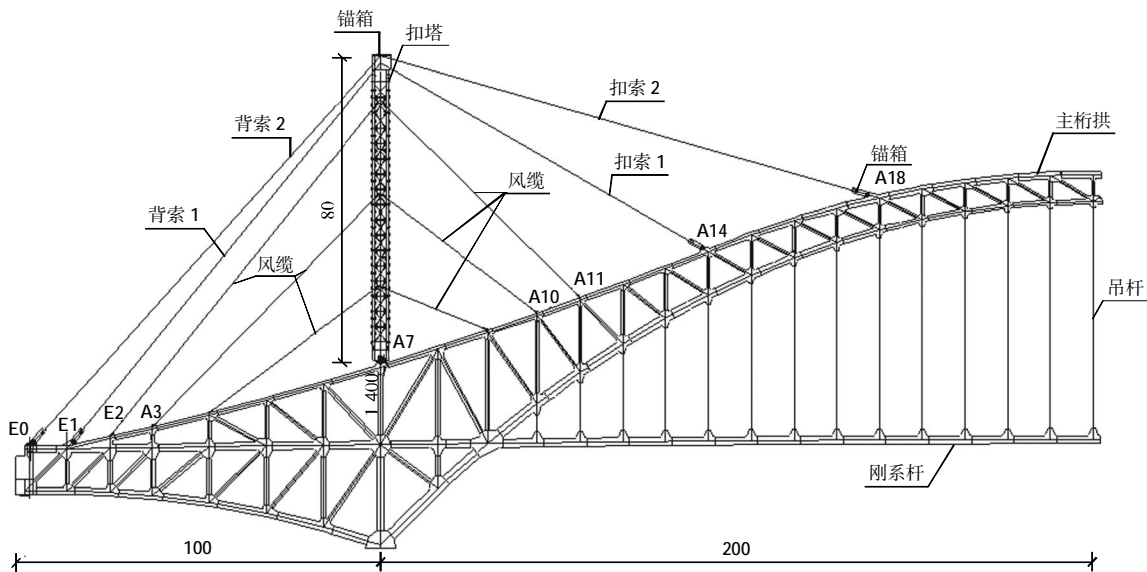


图 4 横琴二桥斜拉扣挂系统结构图
Fig. 4 Structural form of cable inclined pulling and buckling system of the second Hengqin Bridge

表1 各桥斜拉扣挂系统参数表

Table 1 Parameters for cable inclined pulling and buckling system of steel truss-arch bridges

桥梁名称	最大跨度/m	塔架截面形式	塔架高度/m	高跨比(扣塔高度/半主跨)	拉索最小倾角/(°)	扣锚索层数	扣锚索结构形式	最大索力/(kN·桁 ⁻¹)	施工方法
万州长江大桥	360	双H形	60.0	0.33	11.9	1	6根 PES7-91 平行钢丝	12 820	整束张拉
大胜关长江大桥	336	双H形	68.5	0.41	14.9	3	12根 PES7-151 平行钢丝	16 000	整束张拉
朝天门长江大桥	552	4根钢管立柱	100.0	0.36	9.5	2	4束 $\phi 15.24-37$ 钢绞线	17 000	单根张拉
珠海横琴二桥	400	4根钢管立柱	80.0	0.40	14.9	2	4束 $\phi 15.24-37$ 钢绞线	16 500	单根张拉

从表中知,扣塔结构形式有双H形格构立柱和钢管式格构立柱。扣塔高度的确定主要由扣索的倾角、主跨的跨度决定。扣塔越高,拉索竖向倾角越大,扣塔竖向提升钢梁的效果越好,对主桁结构受力越有利,但同时扣塔结构受力(竖向分力)要增大,且扣塔稳定性越不利。综合来看,扣塔高度与主桁半跨之比在0.3-0.4左右。扣锚索层数则根据主桁受力来确定,一般为1-3层。

2) 扣锚索张拉技术

斜拉扣挂系统扣锚索有钢绞线和平行钢丝两种形式。若采用钢绞线体系,则宜采用单根张拉工艺,斜拉索的牵引、张拉比较方便,降低了设备要求。钢绞线斜拉索张拉通常采用索力控制为主、索长控制为辅,一次张拉到位的控制方法,后期一般不再进行调索,即每束钢绞线第一根为基准索,在基准索上装有索力传感器测试索力。通过充分考虑边界条件变化、现场温度、风荷载和临时荷载的因素,计算出基准钢绞线张拉值,其余钢绞线以基准钢绞线张力作为基准进行等值张拉,朝天门长江大桥和珠海横琴二桥均采用此种方法。

若采用平行钢丝体系,则适宜用整体张拉工艺,同时方便调索^[7]。采用此法最大优点是中间过程中调索比较方便,缺点是张拉设备比较笨重,需相应的吊装设备。张拉时一般在下锚箱处张拉,采用“平衡、对称、同步、分级”的原则张拉斜拉索至设计索力,万州长江大桥和大胜关长江大桥均用此法。

7 结语

本文以国内几座主要的采用斜拉扣挂悬臂法

施工的大跨钢桁拱桥施工为背景,对施工关键技术成果进行总结和探讨分析,得出如下结论。

1) 从总体方案上看,对单跨钢桁架拱桥,适宜缆索吊施工,对于多跨拱桥,则适宜采用斜拉扣挂悬臂法施工。

2) 主桁拱安装线形,对于工厂焊接,工地栓接桥梁,其线形主要依赖工厂制造精度来保证,现场主要控制其安装拱度以及桥面轴线。

3) 主桁拱合龙技术中对于三跨拱桥,可采用预偏位移补偿+顶落梁合龙法。边跨钢梁初始架设时往跨中预偏一定距离,边支点预降一定高度,则在主拱合龙时仅需升降边支点微调合龙口转角即可实现主拱无应力合龙,无需大吨位整体移梁,大大减小了施工风险。对于多跨拱桥,可采用“纵移+调索”方法调整合龙口,其纵移时机上也可“预先”纵移。

4) 刚系杆合龙中对于先拱后梁法,可采用施加临时系杆法和限位中支座法。采用限位中支座法可将中支座设计为可增减调界限位块的装置,在合龙前根据需要增减限位块,使主墩限位在合龙时所处理论位置,则合龙时无需顶推中支点。对于拱梁并进法施工,刚性系杆合龙可采用调整索力和千斤顶顶拉设施调整。

5) 斜拉扣挂系统需根据结构受力要求布置。若后期需调索宜采用平行钢丝拉索体系,若后期不需调索宜采用钢绞线拉索体系。采用钢绞线体系利用等值张拉法可使索力张拉均匀性更能得到保证。

参考文献:

[1] 李芳军,彭月桑.万州长江大桥钢桁拱系杆梁桥架设技术[J].

- 中国铁道科学, 2007, 28(6): 136-139.
- LI Fang-jun, PENG Yue-shen. Construction technology for the steel truss-arch tied-bar beam bridge of Wanzhou Yangtze River Bridge[J]. China Railway Science, 2007, 28(6): 136-139.
- [2] 骆双全. 南京大胜关长江大桥主桥钢梁主跨合龙技术[J]. 施工技术, 2009(10): 94-96.
- LUO Shuang-quan. Closure techniques for main span steel girder of main bridge in Nanjing Dashengguan Changjiang River Bridge [J]. Construction Technology, 2009(10): 94-96.
- [3] 骆双全, 于祥君. 南京大胜关长江大桥主桥钢梁南边跨合龙技术[J]. 桥梁建设, 2009(3): 9-11.
- LUO Shuang-quan, YU Xiang-jun. Closure techniques for south side span steel girder of main bridge of Dashengguan Changjiang River Bridge in Nanjing[J]. Bridge Construction, 2009(3): 9-11.
- [4] 周仁忠, 徐国平, 汪存书, 等. 重庆朝天门长江大桥施工控制关键技术研究[J]. 中外公路, 2010, 30(1): 119-125.
- ZHOU Ren-zhong, XU Guo-ping, WANG Cun-shu, et al. Construction control technology for Chaotianmen Yangtze River Bridge of Chongqing[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010, 30(1): 119-125.
- [5] 中交第二航务工程局有限公司. 珠海市横琴二桥钢桁拱安装施工控制方案[R]. 2013: 137-172.
- CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd. Construction technology for the second steel truss-arch bridge of Zhuhai Hengqin[R]. 2013: 137-172.
- [6] 中交第二航务工程局有限公司. 超大跨径钢桁架拱桥施工控制技术研究报告[R]. 2009: 125-142.
- CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd. Report of construction control technology for the long-span steel truss-arch bridge [R]. 2009: 125-142.
- [7] 张永涛, 游新鹏, 彭成明. 一种平行钢绞线斜拉索的张拉控制新方法[J]. 中外公路, 2013(5): 130-132.
- ZHANG Yong-tao, YOU Xin-peng, PENG Cheng-ming. A new tension control method of parallel strands [J]. Journal of China & Foreign Highway. 2013(5): 130-132.

(上接第 61 页)

整频率, 确保桶体下沉最后的垂直度。

4.6 安装效果

截止目前, 195 个桶式结构已经顺利安装完成, 机构单元平面偏差、桶体间距、垂直度等均满足设计要求。具体如下:

1) 安装平面偏差测点数据合格率 $\geq 93\%$, 桶体间距测点数据合格率 $\geq 95\%$, 高程偏差测点数据合格率 $\geq 90\%$, 桶底未达到设计预定底标高的桶式结构, 经人工割除排水管道潜水工具探摸, 发现盖板均已经抵达泥面。

2) 对防波堤两侧的基底海床面进行监测, 未发现明显的冲刷, 堤头冲刷在堤身长度较短时不明显。

3) 目前桶体累计沉降 $< 8\text{ cm}$, 累计位移 $< 3\text{ cm}$ 。

5 结语

桶式结构作为一种新型的插入式单桶多舱结构, 具有节约材料、造价低、绿色环保、施工快捷等优势。通过本工程的实施, 获得专利 2 项, 分别为“一种桶式防波堤基础桶体的搬运及安装工艺”和“一种单桶多舱结构气浮和下沉施工自

动化控制装置”。关键技术的日趋成熟与稳定为后期工程应用奠定了基础, 也为该结构推广到围堤工程、码头驳岸工程、风电基础、桥梁基础等领域提供了技术支持。

参考文献:

- [1] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 连云港港徐圩港区直立结构东防波堤工程初步设计[R]. 2012.
- CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd. Preliminary design of vertical structure for the east breakwater for Xuwei Port Area in Lianyungang[R]. 2012.
- [2] 李武, 魏冰. 桶式结构气浮稳定计算方法[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(3): 16-18.
- LI Wu, WEI Bing. Air floating stability calculation of bucket-based structure[J]. China Harbour Engineering, 2016, 36(3): 16-18.
- [3] JTS 167-2—2009, 重力式码头设计与施工规范[S].
- JTS 167-2—2009, Design and construction code for gravity quay [S].
- [4] 祝业浩, 倪国平, 吴凤亮. 防波堤箱筒型基础结构气浮拖运与负压下沉工艺[J]. 中国港湾建设, 2005(5): 40-43.
- ZHU Ye-hao, NI Guo-ping, WU Feng-liang. Technology for towing of pneumatically floated cylindrical substructures and installing with negative pressure for breakwaters[J]. China Harbour Engineering, 2005(5): 40-43.