

自锚式悬索桥

彭春阳 陆绍辉 蒋业东

【摘要】本文介绍了自锚式悬索桥的特点,国外自锚式悬索桥的发展历史和已建成的自锚式悬索桥的情况;介绍了国内自锚式悬索桥方面的设计、施工经验,并对该桥型的发展、应用前景进行了分析。

【关键词】自锚式 悬索桥

一、前言

主缆是悬索桥的主要承重结构,是全桥结构受力生命线,悬索桥加劲梁上所承受的荷载均通过悬吊系统传递给主缆。悬索桥的类型从主缆锚固方式划分,可分为常规悬索桥与自锚式悬索桥。

常规悬索桥的主缆一般都锚固在锚碇上,锚碇成为常规悬索桥的重要组成部分。

自锚式悬索桥的主缆在边跨两端直接锚固于端横梁上,不另外设置锚碇,主缆的水平拉力由加劲梁提供轴压力自相平衡。

二、自锚式悬索桥的发展史

19世纪后半叶,奥地利工程师约瑟夫朗金和美国工程师查理斯本德分别独立构思出自锚式悬索桥的造型。本德在1867年申请了专利,朗金在1870年在波兰建造了一座小型的铁路自锚式悬索桥。到20世纪自锚式悬索桥已经在德国兴起。1915年德国的工程师在科隆的莱茵河上建造了第一座大型的自锚式悬索桥——科隆——迪兹桥,该桥主跨185米,用临时木脚手架支撑钢梁直到主缆就位。科隆——迪兹桥建成后德国在莱茵河上又修建了4座悬索桥,其中1929年建成科隆——米尔海姆桥,主跨315米,虽然该桥在1945年被毁,但它至今仍然保持着自锚式悬索桥的跨径记录。

自锚式悬索桥的加劲梁大多采用钢结构,如1990年建成通车的日本此花大桥、韩国永宗大桥、

美国旧金山—奥克兰海湾新桥、爱沙尼亚穆胡岛桥,2001年建成通车的桂林丽君桥、正在修建的苏州竹园大桥及正准备开工的天津子牙河大桥等。桂林丽君桥的建成通车为我国自锚式悬索桥设计和施工提供了宝贵的经验。

三、自锚式悬索桥的特点和构成

1.不需要修建大体积的锚碇,这给不方便建造锚碇的地方修建悬索桥提供了一种解决办法。

2.跨径布置比较灵活,可以紧密地结合地形,既可做成双塔三跨的悬索桥,也可做成单塔双跨的悬索桥。

3.自锚式悬索桥的锚固端横梁由于要承受主缆的水平拉力,为了能抵抗并传递水平力,必须加大锚固端横梁的截面。加劲梁为了抵抗水平力,也必须加大梁的截面,桥跨度越大,所需抵抗水平力越大。由此,自锚式悬索桥只能局限于中小跨距的桥梁。

4.自锚式悬索桥的施工工艺有其自身特点。加劲梁因为要承担主缆的水平拉力,需先于主缆安装施工,刚好与常规悬索桥的施工顺序相反。又由于主缆形状非线性的影响,使得吊杆的张拉施工控制相对复杂。

5.自锚式悬索桥相对常规悬索桥而言,既具有造价低,同时具有常规悬索桥的桥型优美、线条流畅的特点,在城市空间受到限制或者考虑经

彭春阳:柳州欧维姆机械有限责任公司 工程师

《OVM通讯》

13

2003年第3期

济性等因素, 自锚式悬索桥都极具竞争力。

自锚式悬索桥通常主要由主缆、主塔、主缆锚固端横梁、加劲梁等主体结构以及主塔顶主索鞍、散索鞍(套)、索夹和吊杆等重要附属系统组成。

四、国外工程介绍

(一) 日本此花大桥

日本此花大桥建成于 1990 年, 又名北港联络桥, 是 1945 年以来修建的第一座自锚式公路悬索桥, 也是世界上唯一一座英国式自锚式悬索桥, 该桥跨径布置为 120m+300m+120m, 加劲梁为单箱三室钢箱梁, 梁宽为 26.5 米, 梁高为 3.17 米, 高跨比为 1:95, 矢跨比为 1:6 (比一般悬索桥的矢跨比要大, 这样可以减少加劲梁的轴力)。该桥吊索做成倾斜状, 桥塔为花瓶形。

(二) 韩国永宗大桥

韩国永宗大桥位于韩国汉城仁川国际机场通往汉城城区的高速公路上, 是世界上第一座双层行车的公铁两用自锚式悬索桥, 其结构造型和尺寸都与此花大桥很相似, 但永宗大桥和此花大桥相比有 3 点区别:

1. 为了减小加劲梁中主缆产生的轴向力, 主缆的垂度加大到 60m, 矢跨比为 1:5;
2. 永宗大桥的 2 根主缆, 从塔顶到加劲梁跨中呈空间三维曲线, 加大了桥梁的横向稳定性;
3. 加劲梁为 7m 高的桁架, 上层为公路, 下层为铁路, 在没有主缆的情况下容易施工。

(三) 美国旧金山-奥克兰海湾新桥

由于旧的美国旧金山-奥克兰海湾桥东桥(钢桁架桥)在 1989 年的里氏 7.1 级地震中坍塌, 因此决定重建。重建计划中包括 2 座自锚式悬索桥,

1 座单塔自锚式悬索桥和 1 座 3 跨双塔自锚式悬索桥。主航道为单塔自锚式悬索桥, 塔高 160m, 由 4 根钢箱柱组成, 沿高度用剪力杆连接, 主缆不跨越而是固定在单一的索鞍上, 跨径为 385m+180m, 加劲梁为 2 个各向异性钢箱, 横隔板间距 5m, 箱梁间用宽 10m、高 2.5m、间距 30m 横梁连接, 以保证两箱在荷载(特别是风和地震荷载)作用时的整体作用。该桥考虑 1500 年回归期的地震, 建成后将成为世界上最大的自锚式悬索桥。

五、国内工程介绍

(一) 桂林丽君桥

建成于 2001 年的桂林丽君桥, 桥长 120 米, 桥中心线为直线。桥面宽 25.5 米, 其中机动车道宽 14 米, 按四车道设计, 分隔带 2×1.25 米, 非机动车 2×2.5 米, 人行道为 2×2 米, 为三跨(25m+70m+25m)自锚式悬索桥。索塔为门式变截面钢筋砼结构, 加劲梁为纵横向钢桁梁。桥面板为 200mm 厚现浇钢筋砼板, 以刚性剪力键与桁梁结合形成迭合梁。主缆与吊杆分别采用由 451 根和 61 根 $\phi 7$ 镀锌高强钢丝组成的成品索。

桂林丽君桥形式独特, 是国内第一座柔性索自锚式悬索桥。它在结构上和施工上主要有以下特点:

1. 主缆锚在锚固梁上, 加劲梁梁端头亦埋入锚固梁上, 锚固梁通过板式橡胶支座放置在桥台上, 加劲梁水平力与主缆水平力平衡。如主缆张力过大则容易引起加劲梁内力超限, 造成加劲梁纵向失稳, 甚至全桥垮塌。因此主缆和加劲梁内力计算和施工控制相当重要。

2. 加劲梁(钢桁梁)采用满布膺架拼装, 在加劲梁合拢后方进行主缆、吊杆架设。这样, 在

表 1 主缆及吊索技术参数表

规格型号	钢丝束面积(mm ²)	钢丝束直径(mm)	双护层索直径(mm)	钢丝束理论重量(kg/m)	破断荷载(KN)	配用锚具规格
PES7-61	2348	63	81	18.4	3920	LZM7-61L
PES7-451	17348	163	189	136.2	28985	LZM7-451L

施工过程中尤其在拆除加劲梁胎架(满布膺架时)吊索索力调整工艺较复杂。

3.主缆采用 451 丝 $\phi 7$ 镀锌钢丝(外包双层 PE)组成的成品索,沿索的方向扭角为 2° ,吊索采用 PES7-61 镀锌钢丝成品索,技术参数见表 1。采用此索型无需庞大的紧缆设备,降低了成本并有效地保证了整根主缆在施工过程中免受雨水侵蚀。

4.桥矢跨比为 1/5.49,相对来说较大。为了确保给索夹施加的紧固力满足设计要求,采用了同步施力和多次复拧的施工方法。

5.由于主缆是利用斜拉索的制造工艺在工厂制造的成品索,刚度较大,在卷盘、运输过程中会产生弯曲和扭曲现象。如处理不当,会给主缆线型调整和索夹定位带来极大的困难。在施工中通过倒拆数值计算和非线性算法,算出无应力状态下主缆上的索夹位置,在工厂制造时预先在主缆上标注出索鞍索夹位置,成功地解决了这个施工难题。

桂林丽君桥全桥预应力产品(主缆、吊杆、索鞍、索夹、冷铸锚等)由柳州欧维姆机械有限责任公司提供并做专项施工。

桂林丽君桥的桥型及施工介绍详见《OVM 通讯》2002 年第 4 期第 2 页《“成品索”悬索及吊索施工工艺》。

丽君桥为国内第一座柔性自锚式悬索桥,它成功地将斜拉索制索工艺应用到悬索桥中,在城市桥梁发展的探索中迈出了重要一步。

(二) 苏州竹园大桥

正在建设中的苏州竹园大桥,是我国目前跨

径最大的自锚式悬索桥,全长 378 米,为三跨(33m+90m+33m)自锚式悬索桥,主桥宽 37.5 米,横跨京杭大运河,连接苏州市中心城区和新区,该桥采用全漂浮结构体系,90 米跨径属我国最大,半弓形环状塔形属我国首次采用,突破了传统中小跨径悬索桥的门式塔形,桥梁结构显得轻巧、优美,见图 1。

竹园大桥的主缆由 19 股平行钢丝束组成,每股钢丝束含 61 根 $\Phi 7$ 钢丝(见图 2、图 3),主缆制作为 PWS 法,主缆安装后不进行缠丝、紧缆工序。由于竹园大桥横跨京杭大运河,河道繁忙,不能架设支架,对施工提出了更高的要求。在主缆架设中,为保证主缆的线形调整,附设了临时锚碇防止端横梁发生位移。桥面系的安装顺序是:现场制作端横梁→安装边跨加劲梁及架设主缆→利用临时锚碇固定端横梁→安装索夹及吊杆→将在工厂预制好的加劲梁利用船只运送到桥下→利用吊杆采用液压提升千斤顶提升加劲梁,在提升加劲梁的同时,调整边跨吊杆的索力以使主缆在索塔两侧的内力平衡。

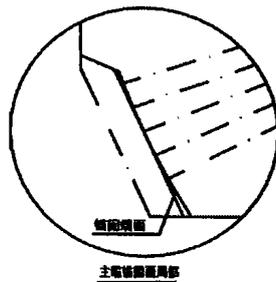


图 2



图 3

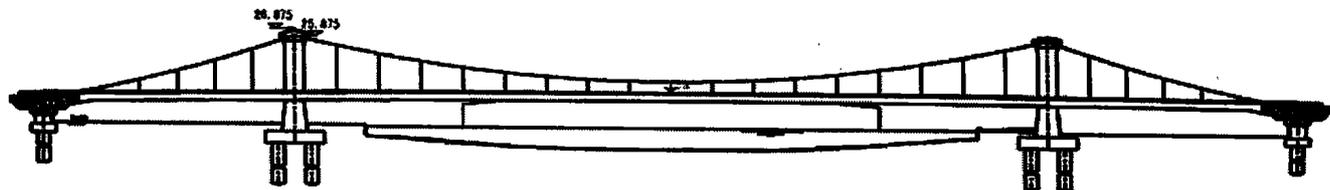


图 1 竹园大桥概况

(三)天津子牙河桥

1.工程概况

天津子牙河大桥为咸阳路跨越子牙河（一级河道）的一座特大桥工程。桥梁主要跨越子牙河以及子牙河南路、子牙河北路两条道路，其中子牙河南路规划宽度为30米、子牙河北路规划宽度为25米，桥位处子牙河堤顶间距为140米。

子牙河大桥主桥采用三跨自锚式悬索桥形式，跨径布置为48.05m+115m+48.05m，桥宽42米，横断面布置为：0.25m（栏杆）+2.25m（人行道）+4m（非机动车道）+2.5m（塔、吊杆锚固区）+24m（车行道）+2.5m（塔、吊杆锚固区）+4m（非机动车道）+2.25m（人行道）+0.25m（栏杆），具体横断面布置见图4。

桥梁主梁采用钢结构，桥面主梁对应桥塔及主缆位置分别采用两片单箱三室钢箱梁结构，两片主梁之间采用工字钢梁，外侧悬挑梁采用工字钢梁，桥面行车道板采用正交异性板形式。

2.悬索体系具体参数

(1)主缆

主缆采用 $\phi 5\text{mm}$ 高强度镀锌平行钢丝，标准强度为1670Mpa，每根主缆由19股平行钢丝束组成，每股钢丝束含127根 $\phi 5$ 钢丝（见图5），锚具采用OVM配套产品。每根主缆长度约为225米。

(2)吊杆

吊杆采用 $\phi 7\text{mm}$ 高强度镀锌平行钢丝成品索，标准强度为1670Mpa。每根吊杆均由61丝组成，锚具采用冷铸墩头锚。全桥共计94根吊杆。吊杆下端与纵向钢箱梁连接，上端与主缆索夹连接，每根吊杆设计力约为70吨。

(3)主缆线形及吊杆布置（见图6）

3.钢结构主梁具体参数

子牙河大桥主梁具体横断面布置形式见图7。

（下转第12页）

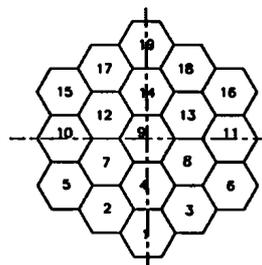


图5 主缆断面布置示意图

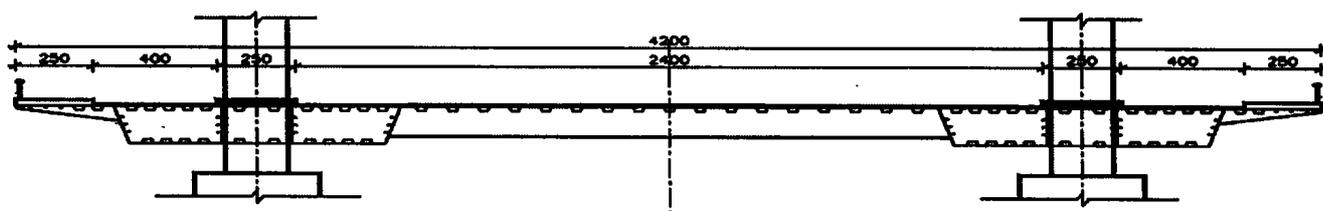


图4 主桥横断面布置示意图



图6 主桥立面布置示意图

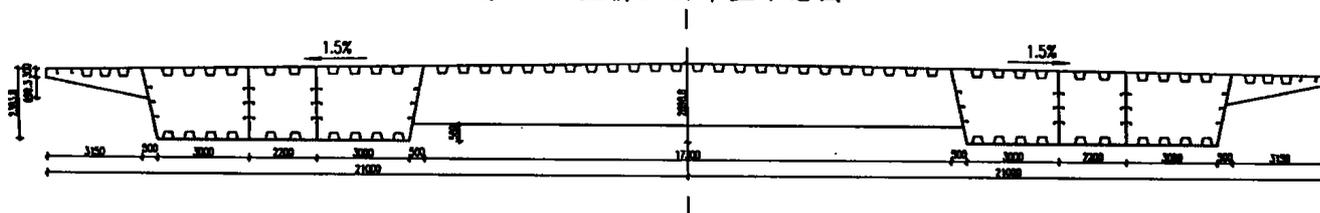


图7 主梁横断面示意图

- d.原吊点将梁吊起后,再牵引至要求位置。
- e.下摆放至桥中悬臂梁混凝土坝处。
- 6)二榀承重梁横移使一榀承重梁立于30米吊梁之上。
- (1)松2只吊点葫芦,并将葫芦钢丝绳收紧。
- (2)横移起重索具:4门葫芦、6/8"牵引钢丝绳及开口安置就序。
- (3)由2台5吨慢速卷扬机牵引横移,河东河西承重梁底脚必须同时移动,可用电钮集中控制。
- (4)横移,使四氟乙烯板在工字钢横移轨上滑动,至使万能杆件承重梁在30米吊梁之上。
- 7)利用千斤顶将30米吊梁在一榀万能杆件承重梁下吊起。
- (1)两只4吨小平车移至跨中处。
- (2)在吊梁上上吊杆,并穿6厘米25#铬钢销子。
- (3)吊杆上螺栓穿过千斤顶座,上好螺栓。
- (4)顶4只50吨千斤顶,做到同步,每次16厘米,顶完后吊梁头部垫道木。
- (5)共顶8次,使吊梁顶高128厘米。
- 8)2榀承重梁同时横移,30米吊过混凝土坝,立于准确位置之上。

- (1)加强2榀承重梁联系杆,使其整体性更好。
- (2)检查横移起重索(牵)引索具。
- (3)启动5吨慢速卷扬机,使吊梁过混凝土坝,准确立于位置之上。
- 9)利用千斤顶使吊梁准确就位。
- (1)检查吊梁位置正确性。
- (2)在吊梁头部整好128厘米道木,并使螺杆螺帽松弛。
- (3)螺帽松至16厘米,然后千斤顶顶起20厘米,抽出一根道木16厘米,松千斤顶,使千斤顶落在道木上。
- (4)重复上步骤,使吊梁逐步安置在盆式支座上。

三、超静定的跨中铰合拢段施工技术

该种型式由于跨中铰处理较难,采用的较少,更不适用于大跨度悬臂施工桥梁。象台北的光复桥采用支架法预制拼装,才有条件保证跨中铰的施工可能,完成只容许梁体转动和水平位移的任务。同时考虑以后由于混凝土的徐变收缩可能导致的下沉,施工时在剪力铰的水平高度增设了20厘米预留拱座。

OVM COMMUNICATION OVM COMMUNICATION

(上接第16页)

六、结语

自锚式悬索桥在中小跨径上是一种既经济又美观的桥型,对公路桥梁和行人桥梁都适合建造。在科学技术高速发展的今天,分析手段越来越先进和完善,尽管自锚式悬索桥还有着自身的缺点和局限,但在中小跨径上是一种很有竞争力的方案,它会越来越受到人们的欢迎和重视。随着实践经验的逐渐积累,自锚式悬索桥的设计理论和

施工方法也将趋于完善,相信在今后建造起更多更大的自锚式悬索桥。

参考文献

1. 颜娟编译. 自锚式悬索桥[J]. 国外桥梁 2002 (1).
2. 张哲、窦鹏、石磊等编著. 自锚式悬索桥的发展综述[J]. 世界桥梁 2003-1.