

## 预制拼装PC连续梁（二）

欧阳克武

### 5 国外预制拼装PC连续梁桥的介绍

预制拼装PC连续梁的施工方法是法国于第二次世界大战刚刚结束后修马恩河桥时首先采用的。因这种节段施法有许多优点，获得了广泛应用，并逐步形成了逐跨连续整体一次架设法、平衡自由悬臂法和连续递进悬臂法等三种方法。第三种方法应用较少，典型的是德国的萨灵海峡桥是应用这种方法从桥的一端连续地向另一端拼装（见图13）。

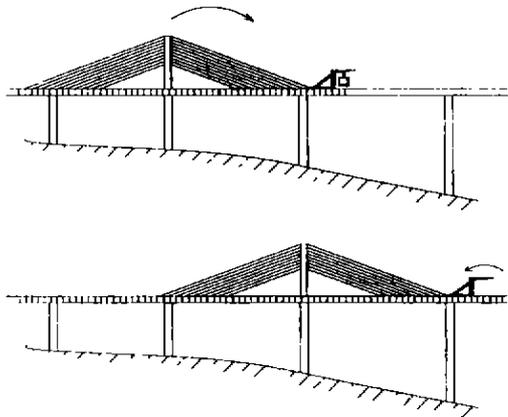


图13

下面仅介绍第一、二种方法。

5.1 逐跨连续整体一次架设法 这种方法就是将一跨的所有节段都放在膺架或桁架上，用体内或兼用体外预应力索串联成整孔梁，再用体外索或体内索与上一跨梁联接形成PC连续梁。最典型的例子是美国的长礁桥[8]和七英里桥[9]、日本的重信高架桥[10]。

欧阳克武:铁道部大桥工程局第一桥梁工程处教授级高工

5.1.1 长礁桥 位于美国的佛罗里达州，是用逐跨连续整体一次架设法完成上部结构，以提前工期和降低造价而著名。

长礁桥有101个标准跨，每跨36m，加上两个端跨，共长3701m。每8跨为一联。体外索在墩顶端横隔板处搭接以提供连续性，在安装跨构的敞开端单端进行张拉。仅用1年时间（1979年10月至1980年10月25日），完成上部结构的逐孔安装任务。这么快的速度得益于节段法施工中采用了体外预应力索、干接缝、先张法横向预应力，安装桁架先进性等。逐孔安装典型操作循环如下：

a. 在箱形梁节段架立之前，将各预制的V形墩安装在各桩帽上。

b. 用一台浮吊将一个钢制的安装时用的桁梁放在相距36m的两个桥墩上，并安放在规定的标高上。

c. 将一个桥跨的所有节段，用一台浮吊吊起放置在安装桁梁上；节段是用驳船运送的。

d. 将一块152mm厚的混凝土块件安置在前面是中跨的墩顶节段与正在安装的本孔第一个节段之间，这一块件用来使每一跨的封闭接缝保持为单一的152mm厚度。

f. 在箱形梁的每一边设置力筋，并施加预应力的10%，将各节段保持在适当的位置。

g. 然后灌注封闭接缝并安装其余的预应力索，V形墩与墩顶节段是在连接缝养护时进行的。当封闭接头混凝土的强度达到不低于17Mpa

时,张拉所有预应力索,并在规定的全部预应力值时进行锚固。封闭接头处混凝土28天的抗压强度,必须与预制节段28天的抗压强度相同。

h.当张拉完毕后,将安装桁梁从各节段底下拆除,并且移动到下一孔备用。移动安装桁梁是用浮吊提升固定在桁梁上的C形钩来完成的。

i.当桁梁向前移动以后,进行灌浆和其他的收尾要程。安装桁架长36m、重77吨、桁架两端各设铰接段以便于在V形墩间移动、桁架的4个角支撑在V形墩4个临时钢立柱上,4个角点设有液压千斤顶,用以精确地控制标高。桁架下弦设预应力索以调整桁架上拱度,使每孔梁7个节段摆上去后(410吨)的满载情况下,确保桁架上弦杆保持水平位置。桁架上弦顶部设不锈钢轨道,轨道上有包有四氟乙烯的三个滑动支承垫块,使每个预制节段在桁架上任意方向移动,以方便对接。为确保线型,节段下可在垫块上增加薄垫片抄垫,调整节段方位。安装桁架移动是利用浮吊提吊安装桁架C形腿的吊钩移向下一待装跨,提起和纵移在三个小时以内就能就位。全

桥仅用一台浮吊,完成安装桁架移动、V形墩架设、节段从存放场上驳船,节段从驳船厂上安装桁架工作,效率很高。

长礁桥的速度是惊人的,平均一个工作班(6天时间)完成五跨180m长的安装和后张预应力工作。而造价每平方英尺仅21.43美元(合人民币1905元/m<sup>2</sup>),这在美国已是相当低的造价了。

七英里桥预制节段长5.4m,宽12m、高2m、重60吨、全桥266跨、每跨41m,全长10931m。每7跨为一联,每跨布置6根预应力索,两相邻跨预应力索相互搭接以提供连续性。该桥也是采用逐跨连续整体一次架设法完成上部结构,也是以提前工期和降低造价而著名。

#### 5.1.2 日本重信高架桥

重信高架桥是日本四国高速公路在松山市跨越重信川后接着又是陆上部分的高架桥,共45孔,全长1901m。是日本首座要用逐孔法架设的桥梁,兼用体内索与体外索,墩顶段在预制拼成后用预应力索与桥墩固接,从而成为预应力混凝土

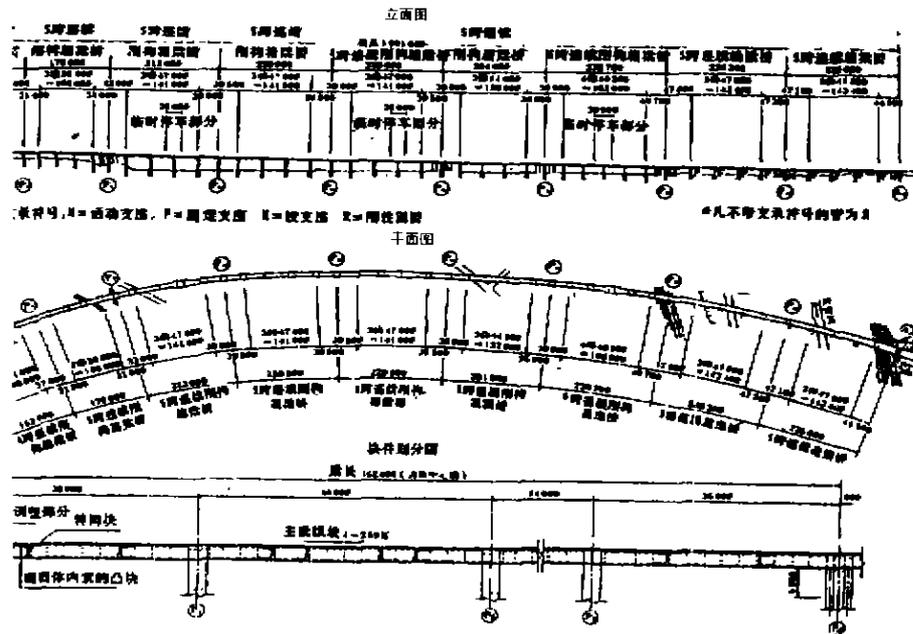


图14 重信高架桥全桥总布置

土连续刚构桥。桥式布置如图14所示，标准箱梁如图15所示。

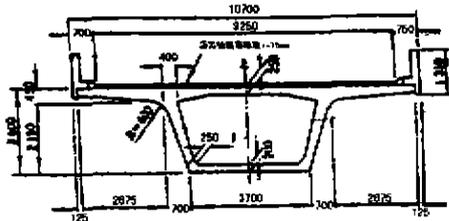


图15 主梁的截面

架设方法比选见表2，经比选，采用逐跨整体一次架设法。

表2 架设方法的研究比较

|                    | 逐孔架设法  | 顶推架设法  | 伸臂架设法   |
|--------------------|--------|--------|---------|
| 适用跨度 (ASBI资料)      | 25~45m | 45~60m | 45~120m |
| 适用跨度 (J.MULLER等资料) | 最大50m  | 30~90m | 50~150m |
| 重信高架桥的地理条件         | 优      | 优      | 良       |
| 跨度                 | 优      | 优      | 良       |
| 施工总长度              | 优      | 良      | 优       |
| 工期                 | 优      | 差      | 良       |
| 综合比较               | 优      | 差      | 良       |

5.1.2.1 箱梁节段预制 节段总数749节，每段重量控制在40~50吨之间，共分5类。梁段高均为2.6m；临时停车部分的节段宽为14.2m，长度为2.0m；墩顶部分有实体隔墙而较重，长度定为1.3m。标准段464节，带体外索转向隔墙箱段有142节，临时停车部分箱段70节，墩顶箱段56节，设2个短线法台座预制，第3个台座要能适应宽度加大的临时停车部分的块件。台座上有横向先张法预应力索的反力梁。每个台座各有7~8人，标准箱段每天1节，非标准箱段2~3天一节，每月生产40节。均在专用台座上预制钢筋骨架，1个工人每天要完成1.5个。灌注混凝土后，用水暖加热养生。一般在次日放张横向预应力索

对桥面板施加横向预应力。

5.1.2.2 逐跨架设法 (如图16) 将架设跨的所有预制梁段支承在架设梁上后，再施加预应力使梁段连接成为该孔跨的梁体，然后逐跨推进，反复进行。本桥45跨中的43跨用逐跨架设法，对截面逐渐加宽的2跨 (长约100m) 用固定支架就地灌注法施工。逐跨架设步骤如下：

第一步：在A1桥台与P1墩之间组拼特殊的支架，在支架上组拼架设梁及其导梁。

第二步：在前方桥墩上安装接受架设梁的托架后，利用托架上的电动滚子及链孔将架设梁拖拉出。架设梁后面按第一步的方法在支架上继续拼装节段。

第三步：将拖车运来的块件用装卸吊机放在架设梁的平车上。然后用滑链按前向后的顺序将平车上的块件移动到所定的位置上。墩顶块件用U形预应力索与桥墩作刚性固结。

第四步：第一孔的块件配置齐全后，在各块件的接合面上喷涂环氧树脂粘结剂，并用预应力粗钢筋将它们拉拢在一起。插入主索 (体内索与体外索)，就地浇注折角接缝调整段的混凝土，凝固后再张拉主索。

第五步：第一孔的主梁架设完成后，松顶将架设梁落下后再用电动滚子将架设梁向前移动一孔，将其固定就位后，再在第2孔上按前所述的

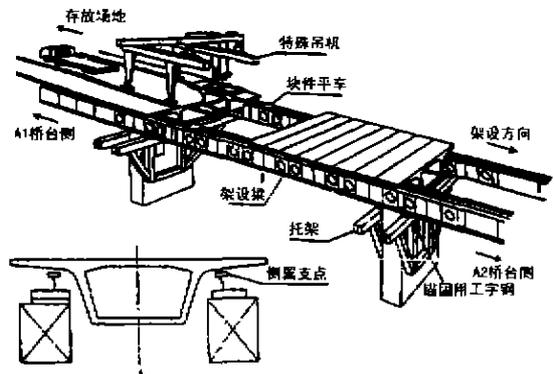


图16

工序重复进行来配置块件。

第六步：重复第四步的工序、就地浇注折角接缝调整段的混凝土，并张拉主索。

第七步：重复第五步与第六步的工序，按A1桥台至A2桥台的方向逐孔向前架设

### 5.1.3 柔佛海峡桥[11]

柔佛海峡桥是马来西亚和新加坡的第二联络桥，位于马来西亚的柔佛市，1994年9月开工，1997年9月建成。桥式布置为（三联6跨连续梁）+（一联3跨连续刚构）+（一联5跨连续箱梁），即 $3 \times (62\text{m} + 4 \times 70\text{m} + 60\text{m})$ 、 $96\text{m} + 165\text{m} + 96\text{m}$ 、 $62\text{m} + 70\text{m} + 78\text{m} + 92\text{m} + 48\text{m}$ ，有效宽度 $2 \times 13.5\text{m}$ 。全长 $3 \times 404 + 357 + 360 = 1929\text{m}$ 。连续箱梁部分均为预制节段由移动式架设梁进行平衡伸臂拼装。

预制节段宽14.5m、长3.35m，每段重为70~134吨不等。节段混凝土强度 $50\text{kg}/\text{mm}^2$ 。节段间的接缝如图17所示，在顶板、底板、腹板上设置

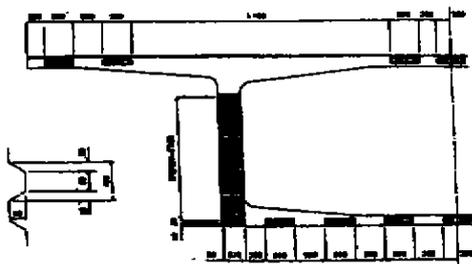


图17

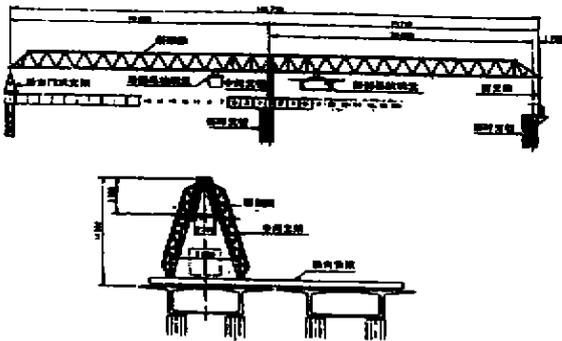


图18

梯形块与槽的剪力键。节段预制采用短线密接匹配法制造。预制节段的移动式架设梁见图18。

架设梁可作横向移动，轮换地架设上下线的梁段。

节段之间环氧树脂涂刷互相接上后，用40mm粗钢筋分别临时锚固在顶板的引拉块和底板中央的固定块上。在合拢后对连续索只张拉75%的预应力，待结构体系完成后再张拉到100%。

## 6. 国内预制拼装PC连续梁

### 6.1 历史的回顾

我国于60年代在成昆铁路的建设中，鉴于该路的中段桥隧相连，仅架梁就需要将近一年的时间，而工期又十分紧迫，为了缩短架梁时间，铁道部组织了预制拼装PC梁的设计、试验、试制、应用工作[12]。其中旧庄河1号桥于1965年10月开始设计，采用了铰接悬臂箱形截面的结构形式，跨径为 $24\text{m} + 48\text{m} + 24\text{m}$ ，梁段用长线台座预制，用悬拼吊车提升胶拼，中间设剪力铰，预应力混凝土柔性锚柱，预应力岩锚桥台。经过一年多的努力，于1966年11月竣工。悬拼速度每昼夜仅一对梁段（长4.8m）。该桥经长期运营表明性能明确，质量良好。另一类是串联式预应力混凝土简支梁，该PC简支梁是将梁片分段在台座上预制，用汽车运到桥位或桥头，胶拼接缝，用预应力索串联张拉成整片梁，用简易架桥机或其它方法架设就位。用该方法完成了47孔共94片23.8m简支梁。上述工作，是我国预制拼装PC连续梁的起点。后因文革动乱，此工作未继续下去。

80年代铁路预制拼装PC连续梁未见大的进展，仅京浦线子牙河串联PC简支梁，跨度也只有40m，公路预制拼装PC连续梁大有收获，典型的有广东江门外海大桥，预制梁段，驳船运输，浮吊提升悬拼。福建洪塘大桥引桥预制梁

段,用穿港式架桥机运送,桁架上逐跨安装;吉林松花江大桥预制梁段,设斜坡溜放梁段到桁架梁上逐跨安装。若将斜拉桥的斜拉索提供免费预应力,也归类于PC连续梁的话,那么就有天津永和斜拉桥。用有360°旋转吊点起吊梁段,电动台车运送在支架上胶拼,张拉粗钢筋将胶拼接缝压紧,挂斜拉索,施加预应力。

90年代预制拼装PC连续梁大有发展。铁路典型的桥梁有长石铁路捞刀河湘江大桥,双线铁路,跨度96m,长线台座预制梁段,用造桥机拼装,体内索,大桥局设计施工。公路桥典型有福州闽江四桥(斜拉桥),长线法预制段,在已成梁上液压提升块件胶拼。

2000年开始笔者仅知道湖北宜昌夷陵长江大桥为三塔斜拉桥,半长线法台座预制梁段,用液压吊升设备提升拼装,现正施工中。

## 6.2 洪塘大桥和松花江大桥逐跨连续整体安装方法介绍[13]

### 6.2.1 洪塘大桥

洪塘大桥在福州市西郊金山寺上游跨越闽江,是316国道的起点公路大桥。滩孔为逐孔拼装PC连续梁,共31跨,每跨长40m,5跨一联和6跨一联,桥面宽12.5m,双箱双室(图19)。

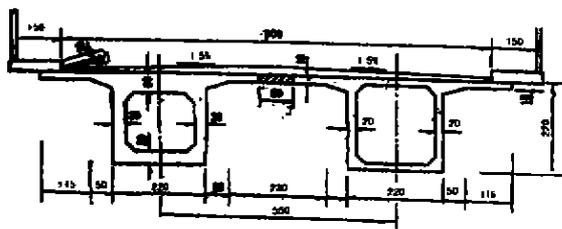


图19

节段划分:纵向双箱双室分离,留80cm宽的现浇缝;横向当为5跨一联时分为46个节段,6跨一联时分为55个节段。节段分为三种规格:端块节段长1.6m,每联两块分设在两端,全桥共24个节段。墩顶节段长3.1m,每联4个节段

(五孔一联)和5个节段(六孔一联),全桥共50个节段。中间节段即标准节段长4.6m,每联40个节段(五孔一联)和48个节段(六孔一联),全桥共496个节段,每个节段的吊装重量均在31t以下。

连续梁是利用由万能杆件组拼的架桥机结合下导梁进行安装。架桥机前跨跨径43m,后跨跨径34m,总长度90m,自重约160t,是专门为此桥而设计的。下导梁也是由万能杆件组拼的,它用万能杆件组成的四片桁架通过横向连接构成的,其长度37.3m;高度2m,宽度2.0m,自重约61t。下导梁拼装在桥头接线预制场上进行,它通过预制场的龙门吊机放在岸孔简支梁轨道平车上,由平车运送至架机后跨,最后可由架桥机吊运就位。

安装顺序分三个阶段:

a. 节段运输就位阶段:箱梁节段从预制场用龙门吊机吊运至岸孔面平车上,运至架桥机后跨,然后由架桥机吊运就位,节段就位顺序:第一跨先吊运前方墩顶块节段,待墩顶块定位完成,依次向后安装箱梁各节段至端头段,安装时每就位一个节段就用特制的夹具与前段夹紧。第二跨先安装墩顶前一节段,然后再安装前方墩顶块节段,待墩顶节段定位完成,依次向后安装箱梁各节段至墩顶段预留10厘米现浇缝。第三跨、第四跨安装顺序同第二孔。第五跨安装顺序是从墩顶块节段接着向前安装至端块。

由于是双箱结构只设一根下导梁,所以在每孔箱梁上游安装完成后必须将下导梁横移到下游就位,待下游安装完成后才可以移至下一孔继续安装。

b. 预应力张拉阶段:本结构预应力设置了主索、附加索和临时索三种,预应力张拉顺序为第一跨先张拉主索,然后张拉跨中的附加索和临时索。第二跨在墩顶块节段前安装完成后张拉墩顶

的附加索，待节段全部安装完成并在10cm，预留的调节缝中垫上混凝土垫块后，先对称张拉两束主束至控制张拉力的10%临时锚固，用早强混凝土浇筑调节缝，待调节缝混凝土达到设计强度80%以上时张拉全部主索和临时索。由于第二跨和第三跨之间，第三跨和第四跨之间的墩顶段不设附加索，所以第三跨和第四跨的预应力张拉顺序除不张拉附加索外其余与第二跨相同。第五跨在墩顶前节段安装完成后张拉顶段的附加索，然后继续向前安装至端头节段完成后，张拉全部主索。

c. 架桥机下导梁纵移阶段：第一跨预应力张拉完成后，纵移架桥机在前一跨就位，下导梁是在架桥机就位后，利用架桥机吊绳通过两箱中间预留的80cm现浇段运至下一跨就位，待下导梁调整完成后，即可进行下一跨的节段安装工作。

预应力钢索的布置如图20所示。主索在底板要求靠近底板的两侧集中布置，（如图20I—I断面）在通过转向弯起至顶板的预应力束是采用平竖弯相结合的空间曲线，并分散锚固在墩顶的横隔板上（如图20II—II断面）。

预应力索在跨中直线段是以同标号混凝土与

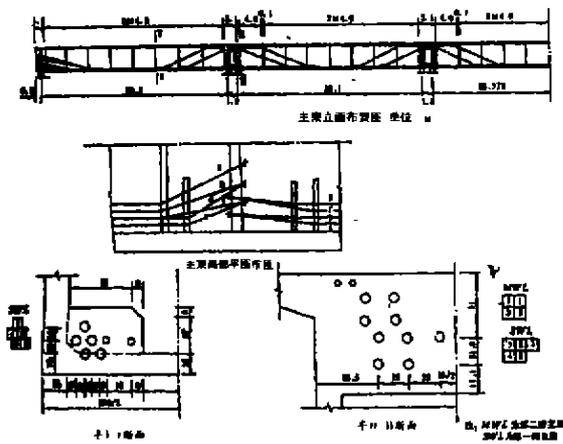


图20 主索布置图

箱梁两侧浇筑成一体，墩顶段设压浆管道，设计时这两段可按有粘接预应力情况处理。预应力弯起段要求在转向块之间控制在10m以内，弯起段为无粘结预应力索。

剪力键和转向块的设置：

节段间的接缝采用了干接缝，箱梁腹板设置式剪力键（图21）。

键的间距25cm，深3m，沿腹板高度相间设置。节段间的干接缝在设计上使用强大的预应力束，使其平面受压，不产生拉应力。这种剪力键能够穿过接缝承受全部应力，而不需要借助树脂的结构帮助，整个承载能力远远超过传递斜拉应力最小能力的需要，安全度达到极限荷载的数倍，所以它简单、安全、又节省造价。转向块的构造见图22。

图中的氯丁橡胶套把埋在转向块的钢管与套在预应力钢索上的塑料套管连结起来，以便于预应力束的灌浆保护。转向块根据预应力产生的竖向分力和水平分力来配置钢筋，同时加设了加强拉筋，以满足转向块的受力要求。转向块的设置

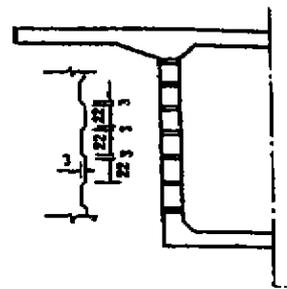
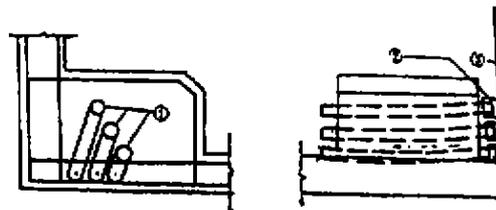


图21 设置复式剪力键



图中：①钢管 ②氯丁橡胶套管 ③高密度塑料套管

图22 转向块构造图

原则在满足结构受力分析要求的基础上,尽量使产生的竖向分力等于各相应点的恒载剪力。这允许了桥跨基本上按零预拱度预制,从而简化了施工预制工序。

### 6.2.2 松花江大桥

松花江大桥在吉林省北部乌金屯跨越松花江,是北京至哈尔滨公路上一座特大桥。桥长917m,分20跨,每跨45m。桥宽大1m。

#### 6.2.2.1 主梁截面形式

主梁为等高单箱室矩形截面。梁高2.5m,顶板宽11m,底板宽5.8m,悬臂板长2.6m(图23)。

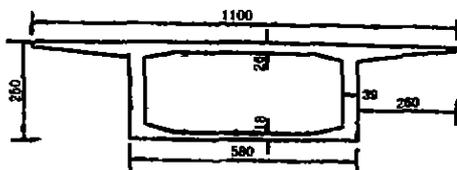


图23 主梁布置图

#### 6.2.2.2 主梁的节段划分

一孔主梁划分为17个节段。标准节段长度为2.64m,起吊重量不超过40t。端横梁隔板采用现浇混凝土以减小起吊重量。主梁节段之间的横向接缝为胶接缝,粘合剂采用环氧树脂,可在负温下施工。为便于主梁拼装时他段之间精确配合,在节段的顶板、腹板上设置了导向榫头。

#### 6.2.2.3 预应力索布置

纵向钢索采用 $24 \times \Phi 5$ 高强度钢丝,全部预应力管道均采用镀锌铁皮波纹管。纵向钢束分腹板索、底板通长索、底板短索、顶板索4种,其中顶板索主要用来为节段粘接时提供一定的均匀正压力。纵向钢索主要布置在腹板中以减短传力路线和有效利用腹板截面。底板短束分四次切断,每次切断6索,锚固在箱底齿板上。为简化芯模制作,箱底齿板采用了统一外形。

横向钢索采用 $18 \times \Phi 5$ 高强度钢丝,每个节段

设3索,梁段养生完成后在堆放场地张拉。

#### 6.2.2.4 主梁节段的预制

主梁预制主要采用短线法配以蒸汽养生。在简易预制棚内全年工厂化生产。每个预制台设两个梁位。第一梁位用来绑扎钢筋、设预应力管道,立模和浇筑混凝土。全断面混凝土一次连续浇筑完成。混凝土浇筑完成后在第一梁位进行第一次蒸养,达到预计强度后即拆模、滑至第二梁位,并作为下一节段的端模。新节段混凝土浇筑完成后进行第一次蒸养的同时,在第二梁位的老节段进行第二次蒸养。经两次蒸养后,节段混凝土的强度基本达到设计强度的100%,即可运出预制棚。依此工序循环进行,完成主梁的预制工作。

梁段内、外模均为钢模板,节段之间涂隔离剂便于分离。工序之间紧凑的衔接和大量的重复工作使预制速度提高很快,经过一段时间后,平均不到4天模板就可周转一次。

逐孔架设的安装主梁所用的钢导梁为桁架梁,结点用螺栓联接,便于安装、拆卸。导梁长108.75m,两片主桁间距3m,上弦杆各节点上设横梁,横梁上设运送主梁节段的滑道。每个滑道由3根钢轨组成。在导梁前端安一台3t卷扬机,用来拖动主梁节段在导梁上滑行纵移。每个主梁节段与导梁的滑道之间均放置4块钢滑板。每个桥墩上均设有导梁临时支座,并配以大吨位千斤顶调整导梁标高。

导梁在自重和主梁恒载任作用下的挠度作为反拱风在横梁上。导梁由卷扬机牵引纵移。

导梁法逐跨拼装工艺主要有3个步骤,即导梁前移就位;节段运输、就位、粘接;施加预应力形成设计的主梁结构。现以有代表性的第三孔为例说明如下:

1) 把导梁拖至第三、四孔就位。开动导梁支座处的千斤顶,使导梁顶面升到设计标高。

2) 在已架好的第一、二孔主梁上铺设钢轨滑道, 运输待拼节段。

第二孔末端的主梁滑道与导梁滑道之间高差2.5m, 在此设置一坡形滑道连接主梁与导梁滑道。坡形滑道由轻便钢桁架组成, 便于拆卸。

3) 利用设在桥头的门架将待拼节段吊到主梁滑道上。节段被卷扬机牵引, 通过主梁经坡道最后滑到导梁上。实践证明采用这种方法纵向运输节段, 安全平稳, 速度较快。

4) 待第三孔的17个节段均移至导梁后, 拆除坡道, 将1~4号节段精确就位, 涂胶粘接; 张拉顶、底板的拼接钢束为截面提供大于0.3Mpa的正压力, 完成第一次拼接。照此, 依次调整其它节段的位置, 涂胶粘接, 张拉拼接钢束, 一孔主梁分四次拼成整体。

5) 根据设计要求, 张拉主梁的第一阶段钢索结束后, 下落导梁使之与主梁脱离, 导梁前移至下一孔。张拉第二阶段钢索(即剩余的全部钢束), 孔道压浆, 完成整孔的主梁安装工作。重复以上各项工作, 主梁逐跨拼装向前推进, 直至全桥上部主体安装工作全部完成。

在导梁上逐孔安装时设计上应注意:

①由于主梁的预应力体系是导梁上张拉形成的。而主梁的刚度较导梁的刚度大很多, 故导梁实际上相当于一个弹性的张拉台座。在施加预应力时, 主梁受自重、预加力和导梁弹性反力的共同作用, 因此必须注意主梁在上述外力共同作用下截面的应力情况, 保证施加预应力时主梁的安全。该桥主梁在自重作用下跨中挠度为4.7cm, 在全部预加力作用下跨中反拱度为6.6cm; 导梁相应位置在主梁自重作用下的弹性挠度为11.7cm; 当主梁的全部预加力一次在导梁上施加完成后, 主梁梁体不能与导梁脱离, 导梁仍对主梁作用有较大的弹性反力。此时主梁在自重、预加力和导梁弹性反力的作用下, 上缘截面处于

危险状态, 有开裂的可能。为此在设计中详细分析了各批钢索张拉时主梁在诸外力作用下的工作状态, 最后确定全部纵向预应力钢索分两个阶段进行张拉。第一阶段张拉的钢索使主梁在导梁上形成初力体系后, 下落导梁使之与主梁脱离。然后再进行第二阶段钢索张拉, 使主梁预应力体系最后完成。第一阶段钢索张拉完成后, 主梁在自重、预加力和导梁弹性反力共同作用下免不了出现最大拉应力小于“规范”施工阶段所规定的允许值。此时导梁下落与主梁脱离, 主梁在自重和第一阶段所施加的预应力共同作用下, 截面下缘要保持一定的压应力, 防止脱胶。施加第二阶段预加力时主梁只受自重和预加力作用。

②在施加第一阶段预应力的过程中, 主梁自重分布在导梁上的分布形式, 随着预应力的施加而发生变化。要防止以座附近导梁个别竖杆发生超载现象。如果有施工中应对支座附近导梁顶面标高进行一次小的调整, 使主梁支座尽早起作用。这样在钢束张拉过程中, 导梁诸杆件均处于逐渐卸载状态, 确保了导梁的安全。

③安装完的孔端主梁滑道与导梁滑道之间有一相当于主梁高度的高差。采用了坡形滑道方案。这种方法简单易行, 安全可靠。虽然由于坡道占据了待拼孔的部分位置, 坡道拆除后节段还需再向回纵移才能就位, 但因节段在导梁上纵移比较容易, 且拆装坡道方便, 故该方案不失为一种较好的方法。

## 7. 大桥局的架设预制拼装PC连续梁的设备

铁道部大桥工程局与铁道部武汉工程机械研究所联合设计研制预制拼装PC连续梁设备, 从1992年6月方案设计开始, 至1995年7月完成设计制造工作, 1996年7月至1997年3月在石长线长沙湘江大桥首次使用, 成功架设了 $40 \times 32\text{m} + 61.65\text{m} + 7 \times 96\text{m} + 61.65\text{m} + 10 \times 32\text{m}$  PC梁。

### 7.1 该造桥机的性能——多功能的适应性

整体吊装32m T梁和40m箱形梁；逐节悬臂拼装（浇注）64m~96m铁路或64m~112m公路PC梁。在桥位上整孔现浇48m的铁路单线箱形梁；具备在同一座桥上架设上述范围内不同跨度的主桥和引桥的能力。

## 7.2 造桥机的设计荷载

### 7.2.1 悬拼工况

主梁自重2.5~4.2t/m，导梁自重1.0t/m，施工线荷载0.1t/m，起重小车自重40t/台，吊重150t，冲击系数0.1，吊具重10t。

设计风荷载：工作时0.3kN/m<sup>2</sup>，非工作时1kN/m<sup>2</sup>。

### 7.2.2 悬浇工况

节段自重≤150t

吊挂设施、底模平台、内外钢模板重≤70t

## 7.3 造桥机的构造

本造桥机由主桁结构、前支腿、中支腿（附牵引主梁前移设备）、后支腿、起重小车、液压系统及电控等部件组成。其中主桁可以拼为32m跨至96m或112m跨。

在长沙湘江大桥上应用成功后，大桥局又自行设计制造了主要用逐跨拼装铁路PC连续梁的设备，只要稍加改造还可应用在公路PC连续梁上。该造桥机已应用于株（州）六（盘水）铁路响琴峡大桥（40m+64m+40m预制拼装PC连续梁）。为秦沈高速客运专用线设计制造的下导梁架桥机，在逐跨整体一次预制拼装PC连续梁是比较方便的。

## 8. 预制拼装PC连续梁的体外索

### 8.1 概述

体外预应力定义为：在结构混凝土构件的载面外采用无粘结预应力索产生的预应力。也定义为：由布置于承载结构主跨本体之外的钢索产生的预应力，钢索仅在锚固区域设置于结构体内，转向装置可在结构体内或体外。简单地说，体外

预应力索是在混凝土或钢结构的外部通过不同的高低锚固点或转向块与结构连接在一起。体外索在PC连续梁时，体外索一般配置示意图见图24。

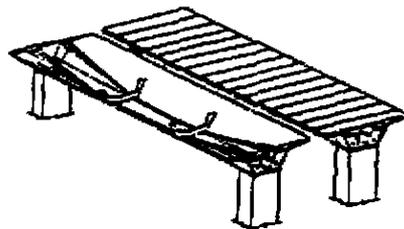


图24 体外索一般配置示意图

平衡伸臂安装预制节段PC连续梁时，钢索的配置：英国的塞文二桥采用全体外索，柔佛海峡在对称伸臂安装时，伸臂索布置顶板内，锚固在顶板端部箱内板上，连续索全部采用体外索。

采用体外索和体内索各有优缺点。

体外索的优点是：

- a. 能够控制及调校钢绞线束的应力，检查腐蚀情况保证在必要时能够替换钢绞线束。
- b. 在箱梁的壁内不存在预应力管道使得混凝土浇注变得容易，不会因为波纹管的存在而减低承压能力，因此可以将箱梁壁厚度减至最小。
- c. 特别的预应力钢绞线束放置容许角度的偏差集中在特定设计的鞍座位置上，这样安排能排除非设计的角度改变所引起的影响，摩擦损失远比体内索小。
- d. 对于某类型的结构，例如预制箱梁结构，使用体外索可能简化及加速桥梁的安装速度以及将建造成本降低。
- e. 体外索可用于加固或修复已修建的混凝土结构。
- f. 体外索亦可使用在结构中无法放置承应力索的结构截面中。例如应用在钢结构或复合结构中。

体外索的缺点是：

a. 由于可提供的预应力钢绞线束偏心率降低, 以及一般设计中还降低钢索的使用应力不从心需增加钢索截面面积, 所以预应力钢材数量比体内索为多。

b. 体外索所使用的高密度聚乙烯套管, 成本高于体内索中所使用的镀锌铁皮波纹管。

c. 在极限荷载状态下, 体外索比体内索需要更大的张拉力。

d. 由于体外索在转向块部位产生高度集中的复杂应力, 极度易产生裂纹, 如法国的西兰斯桥, 从转向点开始在锚块前面发生裂纹, 还在底板上的转向块位置全都有, 因此该部位需要特别设计和精心施工。

e. 体外索对局部弯曲所产生的局部面超荷载较为敏感。

f. 体外索布置在箱梁内, 由于室内潮湿, 更需要精心地保护。在海上盐雾工作环境条件下或海水中易腐蚀断裂, 这是要特别注意的。

体内索的优缺点与体外索的优缺点正好相反。本文只介绍体外索和兼用体内外索。

## 8.2 体外索在预制拼装PC连续梁上的应用

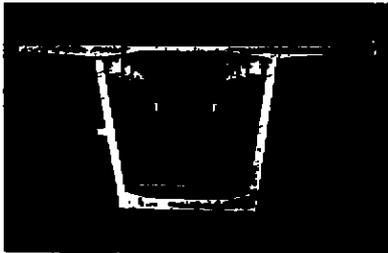


图25

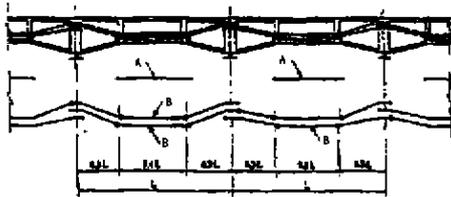


图26

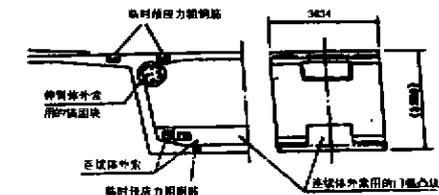


图27

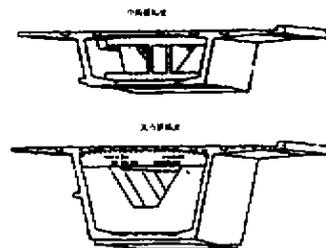


图28

### 8.2.1 英国的塞文二桥的体外索

塞文二桥引桥的标准跨98.118m, 每五跨为一联, 是每隔五跨的在第六跨中央设铰的连续梁, 预制节段, 伸臂安装, 全部采用体外索, 体外索每索由19根 $\Phi 15.7\text{mm}$ 钢绞线组成,  $\Phi 15.7\text{mm}$ 钢绞线是由7根镀锌钢丝绞合而成, 每索极限张拉力5409kN。伸臂架设时箱梁内锚固凸块是一致的。

体外索的布置如下:

#### ①伸臂用的体外索

标准跨度部分伸臂架设时所用的体外索锚固于设在各节段的顶板与腹板固结点边旁的凸块上。所有凸块的形状与尺寸是统一的(图25)。伸臂端最终的一个节段的体外索只有13根 $\Phi 15.7\text{mm}$ 的钢绞线, 极限拉力为370.t。此索为架设时的临时索, 在连续索张拉后即拆除。

#### ②连续用的体外索

伸臂段架设完成后, 在两个伸臂端之间现浇20cm的合拢接缝。然后张拉连续索使结构连续成整体。连续索有2种, 其中一种是布置在跨中长度为0.4L区间内的抵抗正弯矩的预应力索(见

图26中的A索)、另一种是长达2跨且复盖3个支点的预应力索见图26中的B索)。前一种直线索锚固在底板上凸起的门槛上(图27),后一种弯起索锚固在支点处的箱内横隔梁上(图28)。

③转向部分采用双重管方式,转向部分的内部埋有钢制弯管,它具有浇注混凝土之前所定的弯曲度;在出口部分为木制的喇叭形扩大口形成转向部分。转向部分放入高密度DPE管形成双重管(图29)。摩阻系数按0.14(PE管时)及0.20(钢管时)设计。

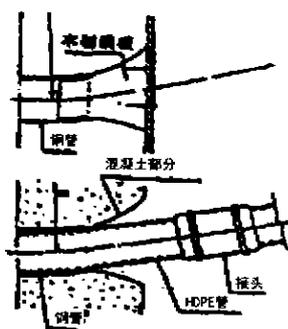


图29

#### ④高密度PE管的施工

在主梁箱内布置高密度PE管,用埋置在顶板中的螺栓及链条级成的吊架来支承。PE管的接头用的是煤气管的接头,接头内藏置电热线,通电后可作熔接用(德国制造的产品)。PE管的长度误差用变化接头的长度来调整。用穿索机将钢绞线穿入PE管。钢绞线穿入后进行张拉,然后将临时固定的接头经电热线热熔接后成为永久的固定,最后在PE套管内压入热蜡来保护体外索。

⑤设置中间固定装置,改善使用体外索时的结构强度安全

由于体外索在套管内压注有蜡液,故体外索本身属无粘结型配筋。在本桥的招标文件中特别规定有:“无粘结索的最大长度不得超过跨长的

40%”。这是因为无粘结索长时,恒载之后的作用荷载所引起的索的变形,在无粘结索的两端固定点之间长度是平均产生的。这个平均的索变形值要小于混凝土部分中的局部大变形值。因此,在破坏荷载作用时混凝土要比无粘结索先行破坏。由于这个原因,无粘结体外索有强度(破坏)安全要比有粘结的体内索小。因此,招标文件中特别写入上述规定,用以限制对强度安全的不利程度。在我国福建的洪塘滩孔跨的无粘结设计中,将体外索在跨中直线段以同标号混凝土与箱梁两侧浇注一体,墩顶段设管道压浆,这两段为有粘结,仅体外索弯起段是无粘结的,也是基于此目的。

因此,在体外索的张拉锚固后(此时作用有主梁自重),于跨间L中的2个0.3L点位置处设置中间固定装置来固定较长的B型体外索。固定装置设在体外索的转向部分。装置是用3根连结钢杆固定在转向部分的混凝土中,在3根钢杆的前端安装一个特殊的固定夹具,在体外索PE管的外侧将管内的体外索夹住。因此,体外索如有变形要移动时,可通过3根连结钢杆将力传到转向部分的混凝土中。此外,3根连结杆的两端设有铰构造,其长度也可各自调整,因此在构造上可以保持体外索在转向部分出口上的应有角度。

#### 8.2.2 蓝巴勒海峡桥

中国香港巴勒海峡大桥长493m(65+3×121+65),预制箱梁节段平衡伸臂安装法,兼用体内索和体外索,布置见图30和图31。

桥梁本身的预应力是通过三组钢绞线束提

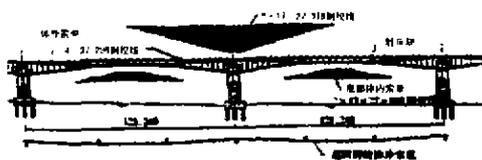


图30

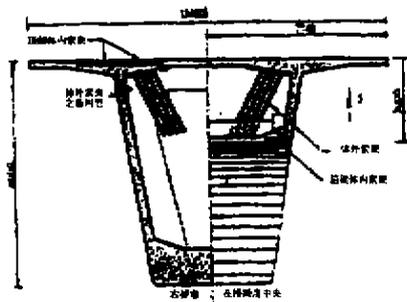


图31

供,其中两组为分别放置于箱梁顶部及底部的体内索,其余一组为安装于箱梁内但置于混凝土外部的体外索。吊置预制箱梁后,箱梁顶的体内索会分期被张拉,以承托悬空的组件。整跨桥梁拼装完成后,箱梁底部的体内索及体外索会相继被张拉,以承托活荷载。全桥一共装置46束体内索及8束体外索,体外索提供的预应力占全部需求应力的20%。

体外索布置示意如图32。钢绞线束可采用涂上防锈油及塑料护套的无粘结单根钢绞线,或采用塑料或在金属管中灌浆粘固的多根钢绞线。这些钢绞线束在压满水泥浆之后,并不像一般预应力钢绞线束一样,沿着预应力钢绞线束安装的位置将钢绞线束粘结至主结构上,预应力体外索仅在鞍座的位置上与结构联结在一起。由于体外索大多为无粘结索,考虑整体结构设计是非常重要的。

此外,美国的长礁桥的预制梁段运用逐跨安装法,全部采用体外索。日本的重信高架桥则是兼用体内索和体外索,在此不一一列举。

### 9. 结束语

由于笔者所掌握的资料有限,可能有很多新技术、新工艺未介绍到,请见谅。并向参考文献作者致以衷心谢意。(全文完)

### 参考文献

- [1]杨进 潮州韩江大桥方案设计与技术构思《桥梁建设》1989,4
- [2]朱华民 潮州韩江大桥上部结构设计《桥梁建设》1989,4
- [3]陈俊真 邹祥珩 宁波小浃江一号桥《预应力四十周年技术交流会论文集》P133—135
- [4]王江 吉林省松源市前扶松花江大桥《预应力四十周年技术交流会论文集》P136—139
- [5]房贞政 上官萍 后张预应力先简支后连续梁桥结构体系研究《第五届后张预应力混凝土学术交流会论文集》P54—58
- [6]夏健中 预应力混凝土箱梁悬拼施工法应注意的几个问题《预应力混凝土结构工程实践经验交流会》论文集
- [7]梁为祥 张寿序译 美国佛罗里达州拼装式桥桥梁回顾与展望《国外桥梁》1990,3
- [8]魏兰英译 周履校 长礁桥的设计特点和预应力概况《国外桥梁》1983年第1期
- [9]周履译 王邦福校 七英里桥,《国外桥梁》1983年第3期
- [10]严国敏译自1996年10月号日本,《桥梁与基础》“重信高架桥的计划 设计与施工”
- [11]严国敏译自日本《桥梁与基础》1996年38号
- [12]成昆铁路技术总结委员会成昆铁路4桥梁 人民铁道出版社1980年
- [13]1989年桥梁学术讨论会中国公路学会桥梁和结构工程学会《公路》编辑部
- [14]严国敏译自1994年5月号日本《桥梁》英国塞文二桥建设情况概况
- [15]许志豪 赖广雄“香港巴勒海峡大桥预应力体外索的应用”《世纪之交预应力新技术》

