

桥梁施工控制技术 (续)

邱式中

(上海市基础工程公司特种基础设计所 上海 200002)

(续上期)

2.2.5 调试

施工控制的核心任务就是对各种误差进行分析、识别、调整,对结构未来状态作出预测。

连续梁桥、连续T构和T构带挂孔形式桥,没有像斜拉桥斜拉索那样容易调整,只能靠立模标高和预应力束来调整,故要保证控制目标的实现,最根本的就是对立模标高作出尽可能准确预测,即依靠预测控制,可采用卡尔曼滤波法。

鉴于该桥已完成节段的不可控制性,以及施工中对成型误差纠正措施有限,控制误差的发生就显得极为重要。所以,采用自适应控制法对其控制也是有效的。另外也可采用灰色理论预测法进行控制。像三滩黄河大桥,对于连续刚构桥部分,采用了预测控制理论作为控制算法、预测模型滚动优化、反馈校正,这是描述预测控制的三个内容。

2.2.6 工程实例

浙江富阳大桥施工控制。

2.2.6.1 工程概况

富阳大桥位于浙江省富阳县内,大桥全长873.34m,桥面宽13m,设计荷载为汽—20、挂—100。全桥采用钻孔灌注桩基础。主桥为5跨连续梁,箱形结构,跨径为52m+3×80m+52m。施工时,2边孔各有11m排架现浇段,其他均采用挂篮悬臂浇筑。每个箱梁段分成12个施工节段,其中0号段长6m,1号~5号长3m,6号~11号段长3.5m。全桥共5个合拢段,详见图9所示。

2.2.6.2 施工控制系统

(1) 施工方案

- ①采用排架法现浇墩上0号段箱梁。
- ②张拉预应力钢筋,将墩、梁和垫块固结在一起(进行临时固结)。
- ③采用4套挂篮悬臂浇筑施工,每套挂篮重力

900kN,附加荷载300kN。施工荷载不得超过3%。

④施工中设计容许不对称施工荷载为一个箱梁段重力。

(2) 施工顺序

全桥4套挂篮先在2号、5号墩上,0号、1号箱梁墩上拼装,并对称进行悬臂浇筑箱梁2号~11号段,与此同时,1号墩、6号墩在陆上、水上搭设排架浇筑箱梁12m现浇段,然后浇筑2号、1号段间,5号、6号段2m合拢段,进行2号、5号段体系转换,同时拆除2号、5号墩上挂篮,再在3号、4号墩上0号、1号梁上拼装挂篮,挂篮现浇2号至11号梁段、浇筑3号、2号墩间4号、5号墩间2m合拢段,再进行体系转换,同时拆除挂篮,进行跨中合拢段施工。

(3)成桥时梁底为二次抛物线,从2号段开始至5号段每段长为3m,6号段至11号段每段为3.5m,要求每段起始点、终止点均在2次抛物线上。确定立模标高和悬浇节段端点标高。

(4)确定每个悬臂浇筑段的预应力束张拉力,主梁挠度、预应力张拉拱度。

(5)满足应力控制及其他约束条件下的预应力容许调整幅度。按前进分析法确定其受力状态,按倒退分析法确定其变形,最后得出理想的梁的变形和内力状态,作为施工控制实施依据。

2.2.6.3 实施

见挂篮悬臂现浇工程实例3:富阳大桥部分。

2.2.6.4 监测

(1) 监测内容

1) 轴线控制

轴线控制,主要控制顺桥向位置正确,使桥梁在施工过程中保持一直线,保证桥梁侧面顺直。

2) 标高控制

- ①每一梁段安装模板后立模标高控制。
- ②每一梁段施工过程中,主梁各控制点的高

程及变形控制。

③若干关键工况基础变位控制。

3) 应力控制

①每一梁段截面尺寸变异。

②每一梁段施工过程中各预应力束的力变化值。

③主梁控制截面应力。

4) 典型气候条件下日照温差对主梁挠度影响。

(2) 施工监测实施

1) 总轴线控制

总轴线由当地建设指挥部在开工前移交, 根据施工要求, 增设由甲乙双方认可的控制点作为桥梁总轴线控制依据, 并经常对控制点进行复测, 保证其桥位线的正确。

2) 箱梁悬臂浇筑时轴线控制

①由总轴线控制点精确放出每墩0号段箱梁的中心轴线, 并对其经常复测。

②放好挂篮轨道线, 使挂篮保持在正确位置上运行。

③在箱梁底模及顶模上做好标记。

④在相邻墩的0号段架观牌, 经纬仪照准后直接投点。

3) 主梁标高控制

主梁标高测量是利用桥梁施工时的测量控制网, 利用高精度全站仪、高精度水准仪测量。

4) 温度影响修正

温度影响包括日照温差和季节性平均温差影响。在施工阶段主要考虑日温差对主梁挠度的影响, 据对箱梁跨中位置进行温度、变形观测, 温差变化 $\pm 10^{\circ}\text{C}$, 标高变化达 $\pm 8\sim 10\text{mm}$ 。为了减少温度对控制参数的影响, 采取下列措施:

①选择气温相对稳定的时间测量, 一般在清晨日出之前测量。

②可选每天观测五次或每天观测一次, 同时刻连续观测五天, 建立温度—变形曲线, 并以此为依据, 对理想设计温度(如 20°C)时的变形值进行修正, 从而间接消除温度影响。

5) 主梁控制截面应力(应变)测试

施工中, 对主梁控制截面的应力(应变)进

行定期观测, 其中钢筋混凝土应力采用钢弦式应力计。

2.2.6.5 调试(施工控制)

在按施工控制要求实施过程中, 由于设计参数误差, 施工过程误差(包括截面尺寸误差引起恒载力与设计恒载力误差)以及测量精度限定误差等, 在每个挂篮悬臂浇筑段施工中都存在实际值与设计值的误差, 调整其误差, 使实际桥梁施工过程中的每一状态控制在最佳范畴内。主要为立模标高预控制, 次之为预应力束调整, 再者为温度影响等。

(1) 立模标高的确定

在主梁悬臂浇筑过程中, 梁段立模标高是关系到主梁线形是否平顺、是否符合设计的关键问题。立模标高总要设一个预拱度, 以抵消施工中产生的各种挠度, 其公式如下:

$$H_{lmi} = H_{sji} + \sum f_{li} + \sum f_{2i} + f_{3i} + f_{4i} + f_{5i} + f_{ql}$$

式中: H_{lmi} — i 节段立模标高(节段上某确定位置);

H_{sji} — i 节段设计标高;

$\sum f_{li}$ —由各梁段自重在各节段产生的挠度总和;

$\sum f_{2i}$ —由张拉各节段预应力在 i 节段引起的挠度总和;

f_{3i} —混凝土收缩、徐变在 i 节段产生的挠度总和;

f_{4i} —施工临时荷载在 i 节段引起的挠度;

f_{5i} —使用荷载在 i 节段引起的挠度;

f_{ql} —挂篮变形值。

其中 $\sum f_{li}$ 、 $\sum f_{2i}$ 、 f_{3i} 、 f_{4i} 、 f_{5i} 五项在前进分析和倒退分析计算中已经加以考虑, 倒退分析输出结果中的预抛高值 H_{ypqi} 就是这五项挠度的总和。这样公式可改写为:

$$H_{lmi} = H_{sji} + H_{ypqi} + f_{ql}$$

预计标高计算公式为:

$$H_{yji} = H_{lmi} - f_{ql} - f_i$$

式中: H_{yji} — i 节段预计标高;

f_i —一块件浇筑完后, i 节段的下挠值。

1) 挂篮变形控制

该桥挂篮是以万能杆件拼装而成的空间桁架作为主要受力体系, 各杆件间均由螺栓连接, 故

挂篮在混凝土及其他荷载作用下除了弹性变形外,还有不可恢复的非弹性变形。为了事先获知挂篮的变形量,在现场模拟挂篮在混凝土浇筑过程中的受力情况,对挂篮进行了预压。

①预压方法

预压以4000kN方驳为荷载,在挂篮前吊带下面用钢丝绳将拉力传感器同4000kN方驳连接起来,由安装在方驳上的卷扬机作为加载动力,电阻应变仪读数。在前横梁和吊带连接处设测点,精密水准仪测读挂篮变形,见图8。

预压采取二次加载,加载顺序及荷载为:第一次加载0→100kN→200kN→230kN→0,第二次加载0→100kN→200kN→0。

②预压结果分析

a. 挂篮的总变形量为43.27mm,其中弹性变形为23.47mm,非弹性变形19.8mm。预压各项数据见表1。

b. 非弹性变形经过一次加载后即可消失,故此类型变形只对未经预压的挂篮在施工第一阶段时才予考虑。

c. 由于得到挂篮在各种施工荷载下的弹性曲线,为控制每节段混凝土浇筑过程中的弹性变形量提供重要参数。

d. 防止挂篮在施工过程中发生非正常变形,除经常对螺栓进行检查外,在箱梁底板、肋板及面层浇筑完混凝土后,均要对箱梁底标高进行观测。

表1 挂篮预压结果汇总表

加载顺序	荷载 (kN)	读数	变形量 (mm)	
			荷载级差 (kN)	累计量 (kN)
第一次加载	0	146648	0	0
	103.95	147792	11.44	11.44
	193.2	150203	24.41	34.85
	233.0	151045	8.42	43.27
	103.95	149818	-12.27	31.00
	0	148598	-12.20	19.80
第二次加载	0	148598	0	0
	95.6	149556	9.58	9.58
	191.6	150760	12.04	21.62
	0	148618	-21.42	0.20

2) 悬臂施工对已施工完箱梁段标高的影响
任一节段箱梁的施工,对已施工完的箱梁段都是一次加载,使原有梁底标高发生变化。为了有效地控制悬臂施工过程中梁底标高的变化,在每一节箱梁施工时,在节段端各设三个测量点,并对其在整个施工过程中跟踪测量。在第一节段施工时,在观测挂篮变形的同时,还应观测0号~(i-1)号节段由于i节段施工所产生的变形,从而得到每节段箱梁在整个施工过程中,由于悬臂施工引起的累计标高变化曲线即箱梁在施工阶段的最终挠度曲线;见图8,从而取得了正确控制悬臂施工对标高影响的重要依据。

3) 预抛高度确定

①根据每节段箱梁的设计混凝土数量,计算出混凝土的重力,然后从挂篮变形曲线查得挂篮变形值 f_{q1} 。

②根据前一节混凝土施工时引起的对已施工完箱梁段的变形值,估计出施工引起的变形值 f_1 。

通过上述方法确定的预抛标高,经施工完后的实际标高测定和设计标高基本相符,达到了预期目的。各节段预抛高度见表2。

4) 预应力束实测结果显示,在悬臂段现浇过程中预应力束张拉对节段影响不大,不再详述。

5) 挠度影响已在监测中叙述,在此不赘述。

(2) 合拢段标高控制

影响因素有以下几个方面:

①箱梁面荷载对标高的影响

箱梁在合拢前是一个静定的T形刚构,当箱梁面荷载发生变化时,梁端的标高会相应发生变化。富阳大桥主桥为五跨连续梁,合拢过程内力变化比较复杂,特别是中跨合拢标高要经过二次合拢、二次体系转换后才能完成,如采用梁面荷载作为调整标高手段,就会影响相邻合拢段的标高。为了排除荷载对标高的影响,该桥在合拢段施工时,都将挂篮退至6号段以后。

②合拢段预应力张拉对标高的影响

合拢段预应力束张拉有两个特点:一是预应力束数量多,边跨40束,边中跨44束,中跨48束;二是张拉顺序较复杂,根据设计要求,合拢段张拉分三个阶段。第一阶段在合拢段临时连接

表2 箱梁施工预抛高度表 (cm)

墩号 \ 节号	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	南/北	南/北	南/北	南/北	南/北	南/北	南/北	南/北	南/北
2	2.5/3.5	2.5/2.5	2.5/2.5	2.5/2.5	2.5/2.5	3/3	3/3	3/3	4/4
3	3.5/3.5	2.5/2.5	2.5/3	2.5/2.5	3/3	3/3	3/3	4/4	4/4
4	3/3	2.5/2.5	2.5/2.5	3/3	3/3	3/3	4/4	4/4	4/4
5	3.5/3.5	2.5/2.5	2.5/2.5	3/3	3/3	4/4	3/3	4.5/4.5	7/3

后、混凝土浇筑前；第二阶段在混凝土达到设计张拉强度后、体系转换前；第三阶段在体系转换后。

为正确控制各张拉阶段的标高变化，在整个合拢过程中三个张拉阶段前后均对各测点进行监测，由于从2号墩边跨合拢及2号~3号边中跨合拢的标高控制中得到了实测数据，为确定6号墩边跨及4号~5号墩边中跨合拢提供了重要依据。各墩合拢段预应力张拉引起的标高变化及测点位置见表3。

表3 合拢段预应力张拉引起标高变化表

合拢部位	观测点	标高变化 (mm)	备注
1号边跨	2号墩北11段	10	
6号边跨	5号南11段	22	
2号~3号边中跨	3号墩南11号段	22	
4号~5号边中跨	4号墩北11号段	8	

③体系转换对合拢段标高影响

所谓体系转换，就是卸除临时固结措施，恢复结构的铰结。体系转换对标高影响主要有以下两个方面。

a. 受力体系转换引起箱梁内力重新分配，从而引起标高变化。

b. 支座变形引起标高变化，主要包括：施工时的临时支座和永久性盆式支座间存在间隙；各盆式支座受力后的变形。

为了得到上述数据，各墩在体系转换前第二次张拉后，在0号段箱梁顶上两个盆式支座位置各设三个测点，用精密水准仪测得第一次数据，同时测该箱梁1号梁段的桥面标高。待体转后用同样方法测得第二次数据，计算整理后得表4所示数据。

(3) 合拢标高确定

①1号~2号墩边跨合拢标高，主要相对11m排架现浇段标高，根据设计标高及施工各种因素决定。

②根据其他合拢段合拢过程中取得的各项数据，结合该合拢段的具体情况确定最终合拢段标高。如6号墩边跨合拢及5号~6号墩边中跨合拢时，由于在1号~2号边跨及2号~3号边中跨合拢的实测数据，且4号墩箱梁及6号墩11m现浇段已完工，故在5号墩11号段施工时，以已得到的数据作为控制值，用相对标高进行控制，最终合拢时，6号边跨标高相差1cm，5号~6号墩边中跨0.5cm，取得了满意效果。

表4 体系转换引起标高变化表

转支部位	测点位置	标高变化 (mm)		备注
		由于支座变形	由于内力变化	
2号墩	0号段南11号段	9.10	23.23	
3号墩	0号段南11号段	19.50	16.17	
4号墩	0号段北11号段	15.08	13.92	
5号墩	0号段北11号段	19.84	15.16	

③为保证合拢标高控制的正确性，全桥五个合拢段合拢时均不用挂篮移动作为调整标高的手段。

富阳桥主桥五跨连续梁挂篮悬臂浇筑施工控制技术，做到了精心设计、精心施工。在梁段悬臂浇筑中，采用预控制技术，正确估算立模标高，保证实际与理论值的基本吻合，在合拢前后又能正确控制合拢标高，最终全桥五个合拢段合拢时最大底标高高差为1.2cm，最小为0.5cm，使之实际梁的受力和变形状态符合了理想受力和变形状态的要求。

3 拱桥施工控制技术

拱桥施工控制技术，就是控制拱圈形成后的内力和变形以及拱上结构形成后的拱圈及桥面系的内力和变形符合设计理想状态的内力和变形。

由于拱圈形成过程施工方法很多，施工控制就要相应保证拱圈施工过程中结构的可靠度和安全性，保证拱圈建成后其曲线及受力状态符合设计要求。

拱圈施工循环性工序相对较少，施工过程中结构调整措施不多，一般采用开环控制方式。施工前对施工过程的充分预计是施工控制的关键。在设计阶段，应对各种施工误差对成桥结果的影响进行分析，制定出合适的施工精度要求十分必要。

3.1 施工控制系统

3.1.1 施工方案

拱圈形成的施工方案主要有以下四种方式。

(1) 支架法

支架法又可分为外置式支架法和埋置式支架法两种。外置式支架法，即在满堂支架上浇筑拱圈或预制拼装拱圈，如赣州东河大桥；为在满堂鹰架上预制拼装拱肋；而埋置式支架法，在我国多为钢管混凝土拱桥，像主跨420m的万县长江大桥，多为先形成钢管埋置式骨架，然后再形成拱圈。

(2) 预制吊装方案

常用的方法为悬索吊施工法，用主悬索吊解决预制拱块的垂直运输、水平运输及吊装工作。该方法常配有扣索或缆风固定拱块，见图9。

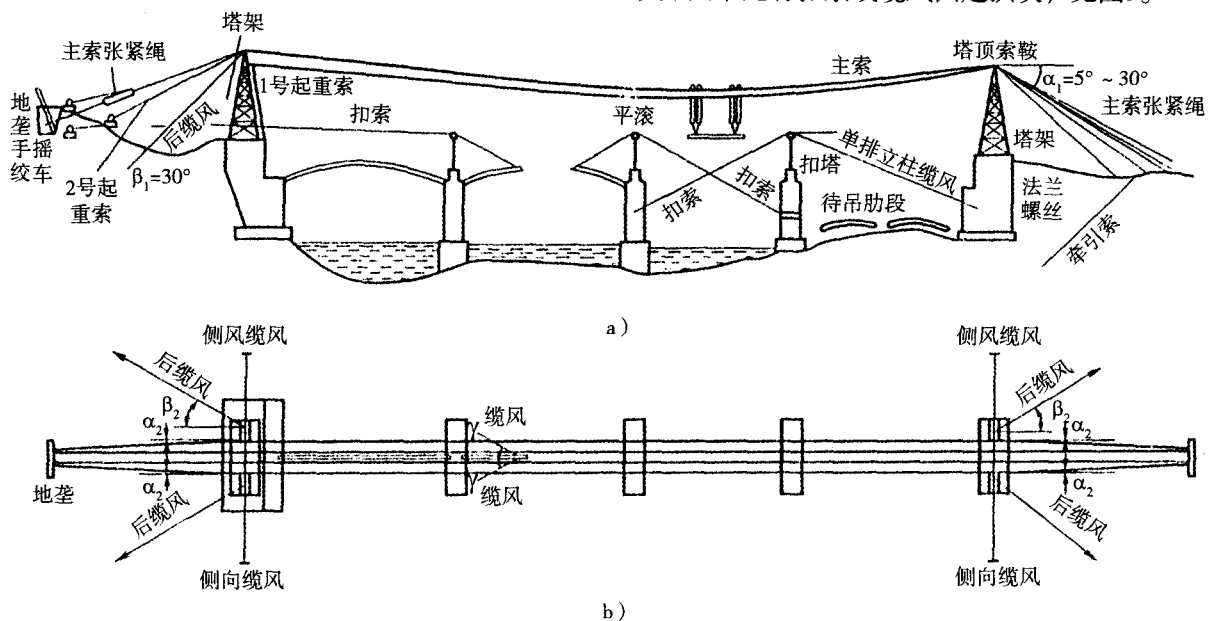


图9 缆索吊吊装拱块示意图

(3) 悬臂施工法

拱圈悬臂施工法主要有两种方式：一是斜拉扣索方式，即在拱桥墩台处设立临时塔架，用水上浮吊或桥面吊机安装拱块、扣索斜拉固定位置，例如上海卢浦大桥；也可用挂篮现浇拱块，浇一块固定一块，直至合拢，见图10。二是桁架式，即借用专用挂篮，结合使用斜吊钢棒（筋），将拱圈、拱上立柱和预应力混凝土桥面板齐头并进施工，边浇拱圈边构成桁架，直到合拢，如图11。

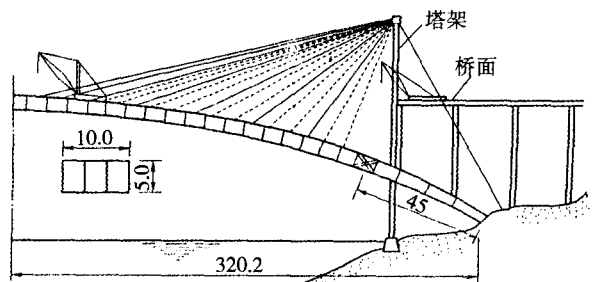


图10 拱桥塔架斜拉扣挂悬臂施工图（尺寸单位：m）

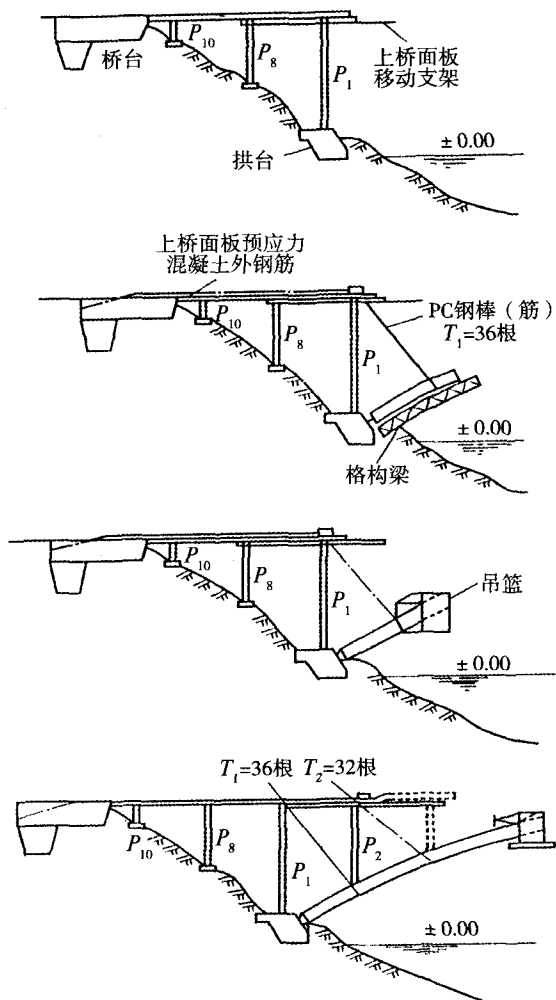


图11 拱桥桁架式悬臂施工图

(4) 转体方式施工

根据两岸地形情况，在两岸制作半拱，然后绕拱座作水平或竖直转动至合拢成拱的施工方法，如图12。

平面转动施工已在第四篇第三章中叙述了，

像主跨360m中承式的广东丫髻沙大桥就是采用先竖转再平转的方法就位的。转体施工的成败在于转动系统的可靠性和转动过程中悬扣索系统、拱圈等受力、稳定和安全性。

3.1.2 正确选取结构参数

由于拱圈施工控制的措施不多，正确选择结构参数、控制施工误差显得十分重要。主要控制如下参数：

- (1) 材料容重；
- (2) 结构部件截面尺寸；
- (3) 材料弹性模量；
- (4) 材料热膨胀系数；
- (5) 施工荷载；
- (6) 预应力索力控制。

3.1.3 根据结构特点，选择合适的计算模式

拱桥结构形式很多，施工方法也很多，要根据其特点选择合适的计算模式。例如丫髻沙大桥，为钢管混凝土结构、转体施工，根据其特点，选取拱肋在支架上张拉脱架阶段、竖转到位阶段为控制阶段进行优化设计。以拱肋受力最优为目标，以索塔高度、撑架位置、扣点位置、扣索根数等为参数进行优化，转动体系经优化定型后，再对各竖转中间阶段进行加密计算。其结构计算简图，足将拱肋弦杆、腹杆、索塔离散为平面梁单元，扣索离散为拉索单元，边孔支架离散为可拆除单元，上转盘离散为刚臂单元，转轴及撑脚离散为杆单元，离散后的结构计算简图见图13。

然后编成程序，进计算机进行计算。得出有关的相应数据。

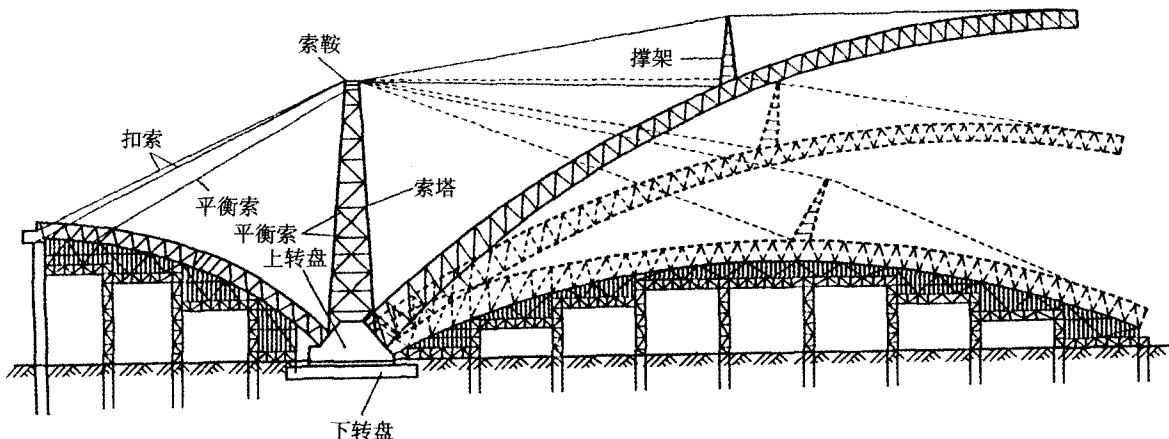


图12 拱圈转体施工示意图

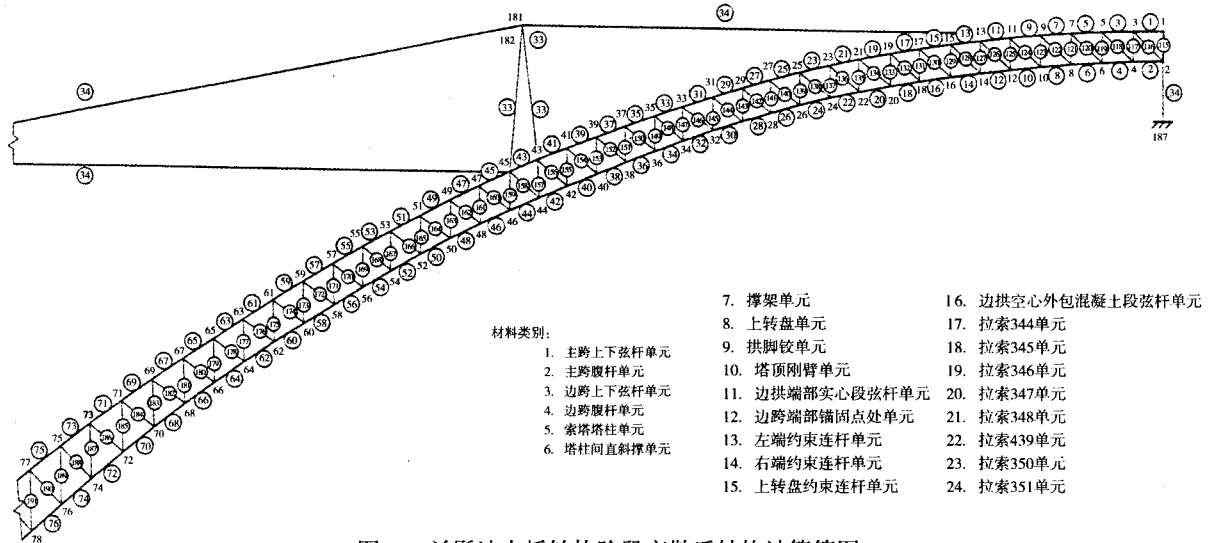


图13 丫髻沙大桥转体阶段离散后结构计算简图

(下期待续)

· 简 讯 ·

詹天佑基金会理事会在京召开

2009年1月14日,北京詹天佑土木工程科学技术发展基金会第一届第三次理事会议在北京召开,会议审议通过了基金会2008年度工作报告和财务报告,讨论研究2009年度基金会工作计划。会议表决通过了基金会理事变更情况,增补柳州欧维姆机械股份有限公司董事长罗志恭等四位同志为基金会理事。会议还就中国土木工程詹天佑奖的评选表彰活动和有关奖励工作听取了与会人员的意见与建议。

中国土木工程学会理事长、原建设部副部长谭庆琏、学会秘书长张雁,基金会副理事长凤懋润、王麟书,基金会各理事、监事以及国家科技奖励工作办公室、北京市民政局、科协有关领导参加会议。

与会人员一致认为,2008年基金会在谭庆琏理事长、张雁秘书长和各上级部门的领导下,在基金会理事、监事的支持下,各项工作取得较大成效,尤其是由学会设立、基金会承办的中国土木工程詹天佑奖的评选表彰工作,积极发挥科技奖励的导向作用,始终坚持弘扬科技创新精神,在推进土木工程行业自主创新,促进新技术推广

应用,激发科技工作者的创新热情和活力,引领行业发展等方面发挥了积极作用。詹天佑奖评选活动坚持不收取任何费用,评选公正、科学、严谨,在业界树立了较好的口碑,影响力和权威性与时俱进,已经成为土木工程行业的品牌奖项。

国家科技奖励工作办公室黄灿宏处长指出:詹天佑奖评选表彰工作是非常出色的,非常高兴看到欧维姆奖也纳入到詹天佑奖系列,希望茅以升奖、欧维姆奖能够借助中国土木工程学会强大的平台更好地开展工作。北京市民政局、北京市科协的代表也在大会上发了言。与会人员还就基金会今后的工作提出了建议。

谭庆琏理事长代表学会和基金会对各主管部门和理事、监事的支持表示衷心地感谢,同时表示詹天佑基金会一定不辜负大家的厚望,做到规范运作、科学管理,本着对人民负责、对社会负责的态度,按照“公开、公正、公平”的原则认真搞好各项评选表彰活动,在引领行业发展、促进土木工程科技进步方面做出努力。

(龙廖乾)