

# 第五篇

## 桥梁工程施工质量控制与管理

# 第一章 桥梁工程施工测量控制

桥梁施工测量的主要任务是精确地测定墩台中心位置、桥轴线测量以及对构造物各细部构造的定位和放样。对大型桥梁来讲,首先必须建立平面控制网、高程系统及测量桥位中线(桥轴线)的长度,以确保桥梁走向、跨距、高程等符合规范和设计要求。

中线测量包括对桥梁两端头设置控制桩的复测;丈量桥轴线长度;补充水准点测量等。补充水准点要对控制桥梁结构的高程,有效地建立施工水准网提供方便。

为使测量工作顺利进行,测量人员必须重视测量工作,要有熟练的操作技能、良好的协作精神及严格遵守测量规范的习惯。测量前必须做好必要的技术和组织准备工作;要熟悉设计文件、图纸和有关测设资料;要与监理单位办理好现场固定桩的交接工作;还应做好测量人员的分工、仪器的校验、施工步骤的制订等项准备工作。

## 第一节 桥涵中线测量

桥位中线(桥轴线)及其长度是用来作为设计预测设墩台位置的依据,所以测量桥位中线的目的,是控制中线的长度和方向,从而确保墩台位置的正确,因此保证桥轴线测量的必要精度是十分重要的。

为了确保桥轴线长度的精度,有时需要建立独立的三角网与国家的控制点进行联测。为了与线路的坐标取得统一,也需要与线路上的国家平面控制点进行联测。

### 一、预估桥轴线长度的精度

在测量桥轴线长度之前,应预先估算桥轴线长度所需要的精度,以便合理地拟定测

量方案和规定各项测量的限差。

桥轴线的精度要求取决于桥长、跨径及其假设的精度,因此估算时应考虑这些因素。

现以某地连续钢桁梁桥为例,该桥共有九孔,分为三联,每孔分为 10 节,每节的上下弦杆的长度为 16m。联与联间支座中心距为 2m,所以桥总长  $D = 9 \times 10 \times 16 + 2 \times 2 = 1444\text{m}$ 。两桥台支座及联与联间的支座安装限差均为  $\pm 5\text{mm}$ 。根据《钢梁验收规范》的规定,钢梁各杆件长度的误差不超过其设计长度的  $1/5000$ ,因此每节的极限误差为  $16000/5000 = \pm 3.2\text{mm}$ ,而每联的极限误差可按下式计算:

$$\Delta\delta = \pm\sqrt{\delta_1^2 + Nn\left(\frac{s}{5000}\right)^2 + \delta_2^2} \quad (5-1-1)$$

式中  $\delta_1, \delta_2$ ——支座安装限差;

$N$ ——每联的孔数;

$n$ ——每孔上(下)弦杆数量;

$s$ ——上(下)弦杆长度。

将上述数据代入式(5-1-1),即可算出每联的极限误差:

$$\Delta\delta = \pm\sqrt{5^2 + 3 \times 10 \times \left(\frac{16000}{5000}\right)^2 + 5^2} = \pm 18.9\text{mm}$$

则全桥钢梁架设的极限误差为:

$$\Delta D = \pm\sqrt{3}\Delta\delta = \pm\sqrt{3} \times 18.9 = \pm 33\text{mm}$$

则全桥钢梁架设的相对中误差为:

$$\frac{m_D}{D} = \frac{33}{2 \times 1444000} = \frac{1}{87515}$$

若测量桥轴线长度的误差小于  $1/87515$ ,说明测量结果的精度是可以的。

## 二、桥轴线长度的测量方法

测量桥轴线长度的方法,通常采用光电测距法(目前使用电子全站仪测量更为方便)、直接丈量法、三角网法等。对于直线桥梁可以直接采用此三种方法进行测量;对于曲线桥梁,应结合曲线桥梁的轴线在曲线上的位置而定。

现分别叙述如下:

### 1. 光电测距法

近年来光电测距仪已得到广泛应用,因其精度高、操作快、计算简便,在通视方面不受地形限制,成为测定桥轴线比较好的一种仪器。

光电测距时应在气象比较稳定,大气透明度好,附近没有光电信号干扰的情况下进行,且应在不同的时间进行往返观测。观测时间的选择,应注意不要使反光镜面正对太阳的方向。

当照准方向时,待显示读数变化稳定后,测 3、4 次,取平均值,此平均值即为斜距。为了得到平距,还应读取垂直角,经倾斜改正后,即为单方向的水平距离观测值(如果用的是电子全站仪,可直接得到平距)。如果往返观测值之差在容许范围之内,则取往返观测值的平均值作为该边的距离观测值。

## 2. 直接丈量法

沿桥轴线方向,地势平坦、可以通视,则可采取直接丈量法测量桥轴线长度。这种方法所用设备简单,精度也可靠,是一般中小桥施工测量中常用的方法。

为了保证施工期间的长度丈量精度和量具精度的一致性,在量距之前应对所用的钢尺进行严格的检定,取得尺长改正数  $\Delta_1$ 。

用钢尺量距的方法如下:

(1)沿桥轴线  $AB$  方向用经纬仪定线,钉出一系列木桩如图 5-1-1 所示,桩的标志中心偏离直线最大不得超过  $\pm 1\text{cm}$ 。为了便于丈量,桩间距应比钢尺的全长略为短一些(约  $2\text{cm}$ )。

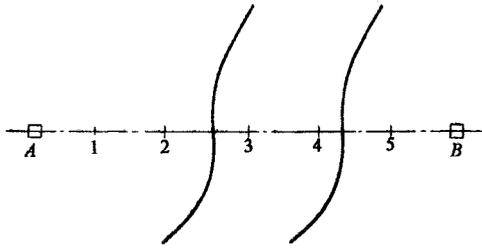


图 5-1-1 桥轴线方向定向图

(2)用水准仪测出相邻桩顶间的高差,为了校核应测两次,读至  $\text{mm}$ ,两次高差之差应不超过  $2\text{mm}$ 。

(3)丈量时应对钢尺施以标准拉力,每一尺段可连续测量三次,每次读数时均应变换钢尺的前后位置,以防差错。读数取至  $0.1\text{mm}$ ,三次测量结果的较差不得超过  $1\sim 2\text{mm}$ 。在测量距离的同时应记下当时的温度,以便进行温度改正。

(4)计算桥轴线长度。每一尺段的丈量结果应进行尺长改正  $\Delta_1$ ,温度改正  $\Delta_t$  以及倾斜改正  $\Delta_h$ ,即:

$$l_i = l'_i + \Delta_1 + \Delta_t + \Delta_h \quad (5-1-2)$$

式中  $l_i$ ——各尺段经过各项改正后的长度;

$l'_i$ ——各尺段未经过各项改正的实量长度;

$\Delta_1$ ——尺长改正数  $\Delta_1 = L_0 - L$ ,  $L_0$  为检定时的标准长度,  $L$  为名义长度;

$\Delta_t$ ——温度改正数  $\Delta_t = l'_i \alpha (t - 20^\circ\text{C})$ ,  $\alpha$  为钢尺线膨胀系数,  $t$  为测量时温度;

$\Delta_i$ ——倾斜改正值  $\Delta_i = -\frac{h^2}{2l_i}$ ,  $h$  为相邻桩顶高差。

则桥轴线一次测量的总长为

$$L_i = l_1 + l_2 + \dots + l_n \quad (5-1-3)$$

取各次丈量结果的平均值,即为桥轴线的长度。

(5) 评定丈量的精度

桥轴线的中误差为  $M = \pm \sqrt{\frac{[VV]}{n(n-1)}}$  (5-1-4)

桥轴线的相对中误差为  $\frac{M}{L} = \frac{1}{n}$  (5-1-5)

式中  $L$ ——桥轴线的平均长度;

$V$ ——桥轴线的平均长度与每次观测值之差;

$n$ ——丈量的次数。

丈量结果的相对中误差应满足估算精度的要求。

### 3. 三角网法

采用直接丈量法有困难时,或不能保证必要的精度时,可采用间接丈量法测定桥轴线,如图 5-1-2 所示。即把桥轴线  $AB$  作为三角网的一个边长,测量基线长度  $AC$ 、 $AD$ ,用三角测量的原理测量并解算,即可得出桥轴线的长度  $AB$ 。

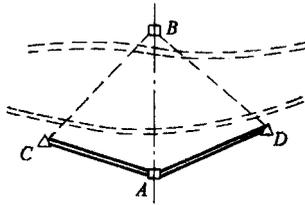


图 5-1-2 桥涵三角网图

## 第二节 桥涵三角网的布置

### 一、布设桥梁三角网的目的

布设桥梁三角网的目的是为了求出桥轴线长度及交会处墩台的位置,因此,布网时应注意以下几点:

- (1)三角点之间视野应开阔,通视要良好;
  - (2)三角点不应位于可能被淹没及土壤松软地区;
  - (3)三角网图形要简单,三角点基础应具有足够的强度;
  - (4)桥轴线应为三角网的一条边,并与基线的一端相连,以确保桥轴线的精度;
  - (5)桥梁三角网的边长与跨越障碍物的宽度有关,如跨河桥梁则与河宽有关,一般在0.5~1.5倍障碍物宽度范围内变动;由于桥梁三角网边长一般较短,故三边网的精度不及三角网和边角网的精度;测角网能控制横向误差,测边网能控制纵向误差,故把两者的优点结合起来,布设成带有基线的边角网为最好;
  - (6)为了校核起见,应至少布设两条基线,基线长度应为桥轴线长度的0.7~0.8倍。
- 考虑上述几点要求,控制网的常用图形有图5-1-3所示的几种。

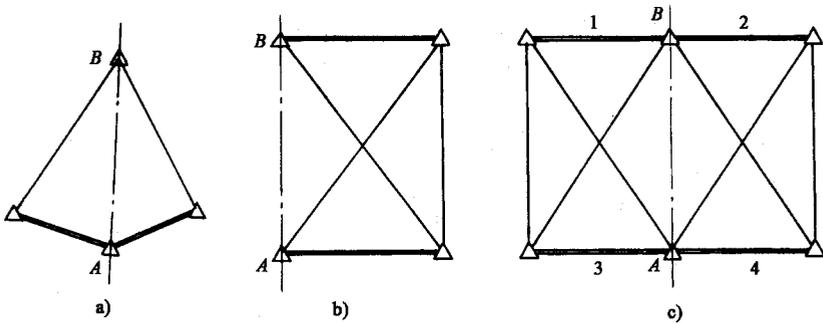


图5-1-3 桥梁三角控制网各种图形

图(5-1-3a)较为简单,适用于一般桥梁施工放样。

图(5-1-3b)是在桥轴线两侧各布设一个大地四边形,适用于大桥的施工放样。考虑近岸处桥墩的交汇,也可在图(5-1-3c)中增设1、2、3、4各插点。

## 二、桥梁三角网必要精度的确定

根据桥轴线的不同精度要求,控制网的测角和测边精度也有所差异,在《公路桥涵施工技术规范》(JTJ 041—2000)中分为五个等级,如表5-1-4、如表5-1-5、表5-1-6所示。

丈量及测量角度技术要求,视三角网等级而定,如表5-1-1、表5-1-2、表5-1-3所示。

三角网的基线以前通常用瓦线尺丈量,现在多数用高精度的光电测距仪或电子全站仪测量。

桥梁三角网一般可测两条基线,其它边长则根据基线及角度推算。在平差时只改正

角度,不改正基线,即认为基线误差与角度误差相较可略而不计。为了保证桥轴线有可靠的精度,所以基线精度比桥轴线的高出 2~3 倍。而边角网的情况则不同,它不是只测两条基线,而是测量所有的边长,故平差时不但改正角度,也要改正边长。

表 5-1-1 水平角方向观测法的技术要求

等级	仪器型号	光学测微器两次重合读数之差(″)	半测回归零差(″)	一测回中 2 倍照准差较差(″)	同一方向值各测回较差(″)
四等及以上	DJ <sub>1</sub>	1	6	9	6
	DJ <sub>2</sub>	3	8	13	9
一级及以下	DJ <sub>2</sub>	—	12	18	12
	DJ <sub>6</sub>	—	18	—	24

注:当观测方向的垂直角超过 ±3° 的范围时,该方向一测回中 2 倍照准差较差,可按同一观测时段内相邻测回同方向进行比较。

表 5-1-2 测距的主要技术要求

平面控制网等级	测距仪精度等级	观测次数		总测回数	一测回读数较差(mm)	单程各测回较差(mm)	往返较差
		往	返				
二、三等	I	1	1	6	≤5	≤7	≤√2(a + bD)
	II			8	≤10	≤15	
四等	I	1	1	4~6	≤5	≤7	
	II			4~8	≤10	≤15	
一级	II	1	—	2	≤10	15	
	III		4	≤20	≤30		
二级	II	1	—	1~2	≤10	≤15	
	III		2	≤20	≤30		

注:①测回指照准目标 1 次,读数 2~4 次的过程;

②根据具体情况,测边可采取不同时间段观测代替往返观测;

③ a——标称精度中的固定误差(mm);

b——标称精度中的比例误差系数(mm/km);

D——测距长度(km)。

表 5-1-3 测量精度等级

测距仪精度等级	每公里测距中误差 m <sub>D</sub> (mm)	
I 级	m <sub>D</sub> ≤ 5	
II 级	5 < m <sub>D</sub> ≤ 10	
III 级	10 < m <sub>D</sub> ≤ 20	

$m_D = \pm(a + bD)$

注:表中符号意义同前。

外业工作结束以后,应对观测的成果进行验算,基线的相对中误差应满足相应等级

控制网的要求,角度误差可按三角形闭合差计算。按照控制网的等级,三角形闭合差的限差如表 5-1-5 所示。

外业成果验算好以后,就转到内业平差极坐标的计算。由于桥梁控制通常是独立网,要求网本身相对位置的精度较高,所以有时虽与附近的城市网联测,但并不强制附和到城市网上,而只是取得坐标的相互关系而已,故桥梁控制网本身的平差还是作独立网来处理。桥梁控制网的平差方法可采用条件观测平差或间接观测平差。

### 第三节 桥涵施工的高程测量

在桥梁施工阶段,除了建立平面控制,尚需建立高程控制。一般在河流两岸分别布设若干个水准基点,作为施工阶段高程放样以及桥梁营运阶段沉陷观测的依据。因此,在布设水准基点时,点的密度及高程控制的精度,均应考虑这两方面的要求。布设水准点可由国家水准点引入,经复测后使用。

为了施工方便起见,应在基点的基础上设立若干施工水准点。基点是永久性的,它既要满足施工要求,又要满足变形观测时永久使用要求。施工水准点只用于施工阶段,要尽量靠近施工地点。

无论是基点还是施工水准点,均要选在地基稳固、使用方便、且不易破坏的地方。根据地形条件,使用期限和精度要求,可分别埋设混凝土标石、钢管标石、管柱标石或钻孔标石。

桥梁的施工水准网需要以较高的精度施测,因为它直接影响桥梁各部高程放样的相对精度。规范要求 2000m 以上的特大桥一般为三等,1000~2000m 的特大桥为四等,1000m 以下的桥梁为五等。

跨河水准测量路线,应选在桥址附近且河面最窄处。为了避免折光影响,水准视线不宜跨过沙滩及施工区密集的地方。观测时间及气候条件,应选在物镜成像最稳定的时刻。为了提高精度,跨河桥梁的水面宽超过 300m 时,应采用双线过河,且应组成闭合环。水准测量的等级及精度要求如表 5-1-7 所示。

高差偶然中误差  $M_{\Delta}$  按下式计算:

$$M_{\Delta} = \pm \sqrt{\frac{1}{4n} \left[ \frac{\Delta\Delta}{L} \right]}$$

式中  $\Delta$ ——测段往返测高差不符值(mm);

$n$ ——往返测的水准路线测段数;

$L$ —水准测段长度(km)

其它水准测量精度要求,可参考《公路桥涵施工技术规范》中有关条款。

水准仪及水准尺一般是根据水准测量等级来选定的,如表 5-1-7 所示。

有了平面及高程控制,就可以进行墩台定位及各种细部放样。

## 第四节 涵洞基础定位与轴线测量

对于涵洞,设计资料一般会给出中心桩号、斜交角、涵长等。根据这些资料,可以测设涵洞中心桩以及轴线。涵洞施工中的测量工作主要是测设涵洞中心桩位以及涵洞轴线方向,下面就这两个问题作一简单讨论。

### 一、涵洞基础定位

涵洞基础定位即测设涵洞中心桩。通常可以利用离桥涵最近的已经测设的中桩位置,计算涵洞中心到前后中桩的距离,采用直接丈量的方法测设,如图 5-1-4 所示。

对于附近有可以利用的导线点时,也可利用路线附近的导线,根据计算的涵洞中心坐标,计算距离和夹角。采用极坐标的放样方法测设涵洞中心,如图 5-1-4 所示。将经纬仪定置在导线点  $A$  上,后视导线点  $B$ ,然后将照准部旋转  $\theta$  角,即为涵洞中心所在方向,在此方向上从  $A$  点开始量取水平距离  $L$  所得就是要测设的涵洞中心。

### 二、涵洞轴线测量

根据涵洞轴线与路线方向是否垂直,涵洞分为正交涵洞与斜交涵洞。

对于正交涵洞,在涵洞中心位置确定以后,可利用方向架确定其轴线方向。或者将经纬仪架设在涵洞中心桩处,后视路线方向,盘左、盘右旋转  $90^\circ$  (或  $270^\circ$ ),取其平均位置,即为涵洞轴线方向。为了方便在施工过程中恢复轴线,一般在轴线方向设立护桩,如图 5-1-4 所示。

对于斜交涵洞,可将经纬仪架设在涵洞中心桩处,后视路线方向,盘左、盘右旋转一个角度为斜交角  $\varphi$  (或  $180 - \varphi$ ),取其平均位置,即为涵洞轴线方向。

如果附近有导线点可以利用,也可根据设计资料,确定轴线上某两点  $a$  和  $b$  (即确定涵洞中心沿轴线到  $a$ 、 $b$  的距离,  $a$ 、 $b$  应在涵洞边线外侧)的坐标,则  $a$  (或  $b$ )与两个导线点形成一个夹角,计算夹角和距离,然后可以用极坐标的方法测设  $a$  和  $b$  的实际位置,并

设置护桩  $a'$  和  $b'$ 。

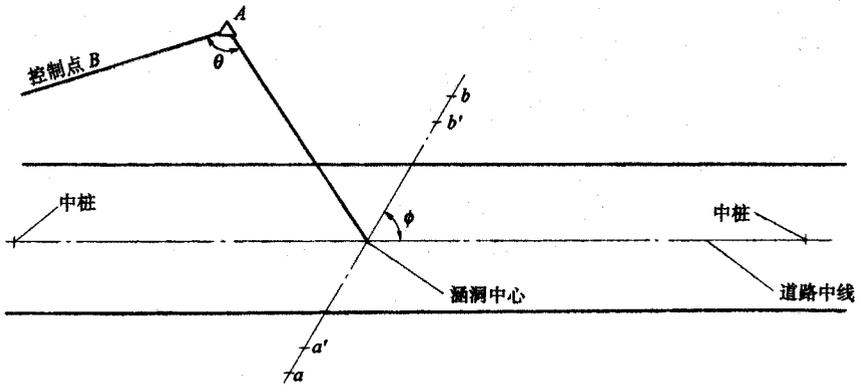


图 5-1-4 涵洞中心桩位及轴线测设

## 第五节 桥梁墩台定位与轴线测量

在桥梁施工测量中,最主要的工作是准确地定出桥梁墩、台的中心位置和它的纵横轴线,这些工作称为墩台定位。直线桥梁墩台定位所依据的原始资料为桥轴线控制桩的里程和墩、台中心的设计里程,根据里程算出它位之间的距离,按照这些距离即可定出墩、台中心的位置。曲线桥所依据的原始资料,除了控制桩及墩、台中心的里程外,尚有桥梁偏角、偏距及墩距或结合曲线要素计算出的墩、台中心的坐标值。

水中桥墩的基础施工定位时,由于水中桥墩基础的目标处于不稳定状态,在其上无法使测量仪器稳定,一般采用方向交会法,如果墩位在干枯或浅水河床上,可用直接定位法,在已稳固的墩台基础上定位,可以采用方向交会法、距离交会法、极坐标法或直角坐标法。

### 一、直线桥梁的墩台定位

位于直线段上的桥梁,其墩、台中心一般都位于桥轴线的方向上,如图 5-1-5 所示。根据桥轴线控制桩  $A$ 、 $B$  及各墩、台中心的里程,即可求得其间的距离。墩位的测设,根据条件可采用直接丈量法、光电测距法或交会法。

#### 1. 直接丈量法

当桥墩位于地势平坦,可以通视,人可以方便通过的地方,用钢尺可以丈量时,可采用这种方法。丈量前钢尺要检定,丈量方法与测定桥轴线相同。不同的只是此处是测设已知长度,在测设前应将尺长改正数、温度改正数及倾斜改正数考虑在内,将已知长度转化为钢尺丈量长度。

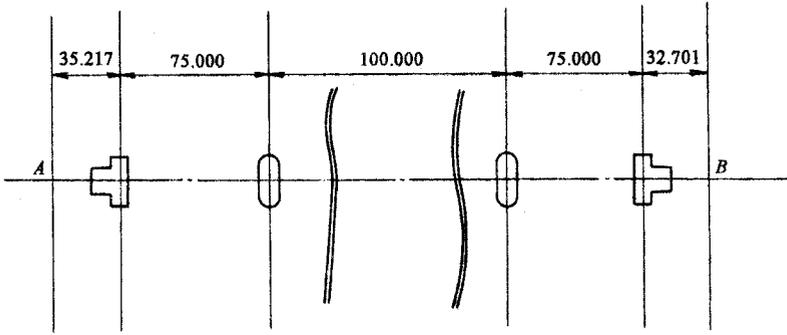


图 5-1-5 直线桥梁位置图

为了保证丈量精度,施测时的钢尺拉力应与检定时钢尺的拉力相同。

## 2. 光电测距法

只要墩台中心处能安置反光镜,且经纬仪和反光镜之间能通视,则用此法是迅速方便的。

但测设时应根据当时测出的气压、温度和测设距离,通过气象改正,得出测设的显示斜距。在测设出斜距并根据垂直角折算为平距后,与应有的(即设计的)平距进行比较,看两者是否相等。根据其差值前后移动反光镜,直至两者相符,则反光镜处即为要测设的墩位。

## 3. 方向交会法

如图 5-1-6 所示,AB 为桥轴线,C、D 为桥梁平面控制网中的控制点, $P_i$  为第  $i$  个桥墩设计的中心位置(待测设的点)。A、C、D 三点上各安置一台经纬仪,A 点上的经纬仪瞄准 B 点,定出桥轴线方向;C、D 两点上的经纬仪均先瞄准 A 点,并分别测设根据  $P_i$  点的设计坐标和控制点坐标计算的  $\alpha$ 、 $\beta$  角,以正倒镜分中法定出交会方向线。

理论上从 C、A、D 指来的三条方向线是交于一点的,该交点就是要测设的桥墩中心位置。但实际上由于测量误差的存在,三条方向线一般不是交于一点,而是构成误差三角形  $\Delta P_1 P_2 P_3$ 。如果误差三角形在桥轴线上的边长( $P_1 P_3$ )在容许范围之内(对于墩底放样为 2.5cm,对于墩顶放样为 1.5cm),则取 C、D 两点指来的方向线的交点  $P_2$  在桥轴线上的投影  $P_i$  作为桥墩放样的中心位置。

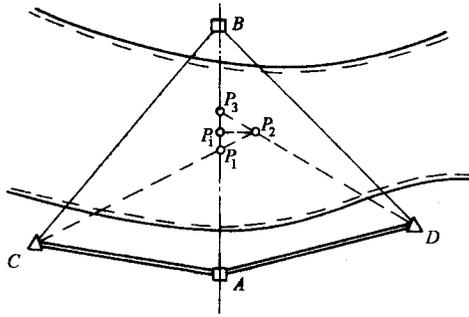


图 5-1-6 三方向交会法的误差三角形

在桥墩施工中,随着桥墩的逐渐筑高,中心的放样工作需要重复进行,且要求迅速和准确。为此,在第一次求得正确的桥墩中心位置  $P_1$  以后,将  $CP_1$  和  $DP_1$  方向线延长到对岸,设立固定的瞄准标志  $C'$  和  $D'$ ,如图 5-1-7 所示。以后每次作方向交会放样时,从  $C$ 、 $D$  点直接瞄准  $C'$ 、 $D'$  点,即可恢复点的交会方向。

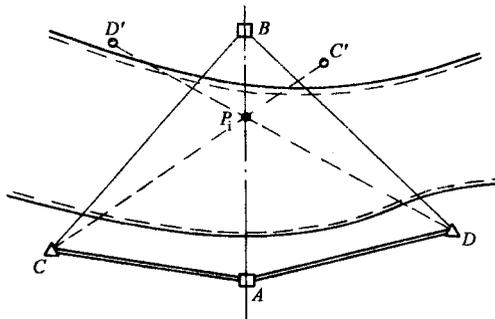


图 5-1-7 方向交会法的固定瞄准标志

#### 4. 极坐标及直角坐标法

在使用经纬仪加测距仪(或使用全站仪),并在被测设点位上可以安置棱镜的条件下,若用坐标法放出桥墩中心位置,则更为精确和方便。

对于极坐标法,原则上可以将仪器置于任何控制点上,按计算的放样数据——角度和距离测设点位。

对于全站仪,则还可以根据测站点、后视点及待放点的直角坐标,自动计算出待放点相对于测站点的极坐标数据,再以此测设点位。

但若是测设桥墩中心位置,最好是将仪器安置于桥轴线点  $A$  或  $B$  上,瞄准另一轴线点作为定向,然后指挥棱镜安置在该方向上测设  $AP_1$  或  $BP_1$  的距离,即可定出桥墩中心位置  $P_1$  点。

## 二、曲线桥的墩台定位

在整个路线上,处于各种平面曲线上的桥梁并不少见,曲线桥由于桥梁设计方法不同而更复杂些。曲线桥的上部结构一般有连续弯梁和简支直梁等形式,但下部一般都是利用墩、台中心构成折线交点而形成弯桥,如图 5-1-8 所示。

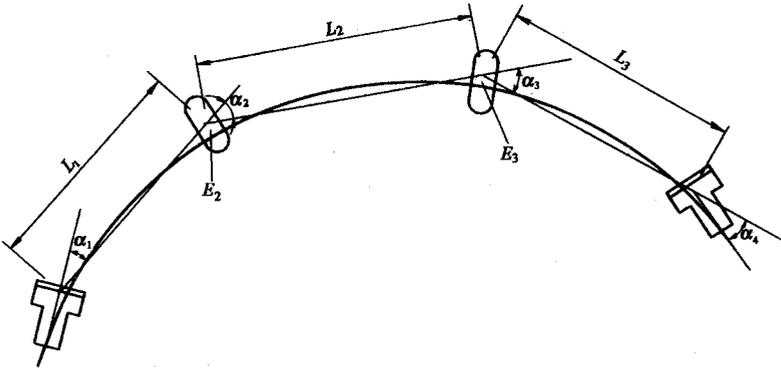


图 5-1-8 曲线桥的布置

一般路线设计中常用的有圆曲线和缓和曲线,它们的要素有较为固定的计算公式。

在设计文件已给定墩、台定位有关数据时,只需重新复核无误即可按其进行放样定位。但数据通常并不能满足施工的需要,应按路线测设资料、曲线有关要素,由计算公式求出各墩台中心为顶点的直线,再用偏角进行定位。

对于坐标值的计算,一般在直角坐标系中进行较为普遍、简便。可以先建立以墩台中心为原点,切线及法线方向为坐标轴的局部坐标系,在局部坐标系中确立待放点局部坐标值;再利用墩台中心的路线坐标值将局部坐标值转换至路线坐标中。

墩、台定位的方法,根据不同的条件可采用偏角法、长弦偏角法、利用坐标的交会法和坐标法等。曲线桥的放样工作,主要是对放样数据的计算,基本步骤的差异并不大,在此不再详述。

## 三、墩台纵横轴线的测设

墩台中心测设定位以后,尚需测设墩台的纵横轴线,作为墩台细部放样的依据。

在直线桥上,墩台的横轴线与桥的纵轴线重合,而且各墩台一致,所以可以利用桥轴线两端控制桩来标志横轴线的方向,而不再另行测设标志桩。

在测设桥墩台纵轴线时,应将经纬仪安置在墩台中心点上,然后盘左、盘右以桥轴线方向作为后视,然后旋转 90°(或 270°)取其平均位置作为纵轴线方向,如图 5-1-9 所示。因为施工过程中经常要在墩台上恢复纵横轴线的位置,所以应于桥轴线两侧各布设两个固定的护桩。

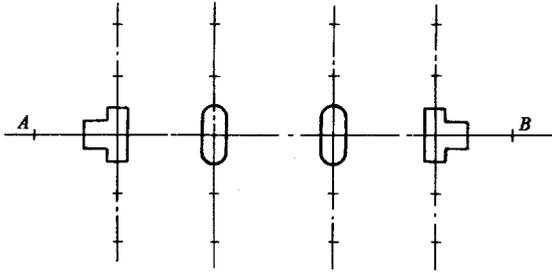


图 5-1-9 直线桥梁纵横轴线图

在水中的桥墩,因不能架设仪器,也不能钉设护桩,则暂不测设轴线,等筑岛、围堰或沉井露出水面以后,再利用它们钉设护桩,准确地测设出墩台中心及纵横轴线。

在等跨曲线桥上,墩台的纵轴线位于梁的中心线顶点处的分角线上,而横轴线与纵轴线垂直,如图 5-1-10 所示。因此测设时,应置仪器于墩台中心点上,以相邻墩台中心方向为后视,测设  $(180^\circ - \alpha)/2$  角即得纵轴线方向,自纵轴线方向转  $90^\circ$  角即测得横轴线。或是将全站仪置于墩台中心,输入中心坐标、后视点坐标,放样点输入中心的曲线切线(法线)方向上任意点的坐标,则可以得到纵(横)轴线方向。无论是在纵轴线还是在横轴线方向上,均要测设四个固定的护桩。

当墩台定好位及其纵横轴线测设已毕,就为细部施工放样做好了准备。

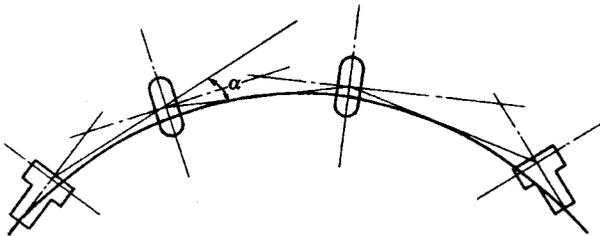


图 5-1-10 等跨曲线桥纵横轴线图

## 第六节 全站仪放样技术

随着科技的发展,测量仪器不断更新换代,在施工测量中使用更为精密、方便的测量仪器为加快施工进度、降低施工难度、提高施工测量精度提供了广阔的空间。现在广为

应用的全站仪便是新科技产物的一员。现代电脑型电子全站仪,在一个测站上不仅能同时测得水平角、竖直角、距离(斜距、平距和高差)和三维坐标,并且可以根据观测数据自动计算出待定点的平面坐标和高程。还带有许多应用软件,如设计坐标和高程的放样等,使工程测量能以较高的工效和精度进行。

全站仪的型号很多,其键的设置、菜单模式、屏幕显示模式各不相同,但使用方法大体上是相同的,在此就不对具体型号进行说明了,仅对基本使用加以说明(具体功能的实现可参见仪器使用说明书)。

### 一、观测前准备工作

1. 装入电池。

2. 安置仪器:对中、整平(圆水准、管水准气泡居中)同一般经纬仪。

3. 开电源准备观测:打开电源后,仪器将进行自检,以保证能正常工作。自检完毕,仪器正常,则可进行水平度盘和垂直度盘定标工作。即松开水平制动螺旋和垂直制动螺旋,旋转照准部和望远镜,各听到一声音响,完成水平度盘和垂直度盘定标。若在度盘定标后出现错误信息,则应重新用脚螺旋置平仪器。

### 二、角度测量

角度测量包括一般的垂直角和水平角观测、水平度盘方位的设置、左角或右角显示等。

#### 1. 一般角度测量

一般角度测量基本与经纬仪测角程序相同。在测前准备工作完毕后,用望远镜照准第一目标,记录垂直度盘读数,根据测量工作的需要,可将水平度数归零或记录水平度盘读数,再照准第二目标,记录水平度盘读数或垂直度盘读数,即得水平角或垂直角。

#### 2. 设置水平度盘读数

全站仪同经纬仪一样,也可使照准某一目标后的水平度盘读数为某一数值。

#### 3. 设置左角或右角显示

设置成左角或右角显示相当于将水平度盘设置成顺时针或逆时针注记。

### 三、距离测量

#### 1. 设置棱镜常数及气象参数

由于不同的反射棱镜有不同的棱镜常数值,所以在测距前必须根据所使用的棱镜输入棱镜常数。另外,由于光在大气中的传播速度受气温和气压的影响,因此,在精密测距

时,需要进行气象改正,一般只要输入气温和气压即可。

## 2. 距离测量

距离测量是与角度测量同时进行的,测量时,在测距模式下望远镜的十字丝中心照准棱镜中心,按确认键即得。距离测量的三种显示方式(斜距、平距或高差)是预先设置参数时决定的,其中斜距是光电测距单元的原始观测值,平距和高差是根据垂直角由斜距换算而来的。

## 四、水平角和距离的放样测量

就是利用极坐标法在实地定出所要求的点。如果在放样的地方可以架设仪器,局部需有多个放样点,且相对于架设点的位置较为明确时一般常采用此种方法。

将全站仪架在测站点上,照准后视点并设置水平度盘读数为 $0^{\circ}00'00''$ ,输入水平距离及水平角放样数据,在待放样点的大概位置上安置棱镜;将全站仪照准棱镜,先确定方向,根据显示的角度(放样值与实测值之差)移动棱镜,直至显示的角度值为零;再确定距离,在方向上大致距离选择一点,仪器照准棱镜根据显示的距离(放样值与实测值之差),移动棱镜,则安置点即为待放样点,也可根据距离差在方向上量取距离差为零的点,并架设棱镜检验。

## 五、直角坐标放样测量

对于全站仪,利用直角坐标放样既快捷,又准确,能够较好地满足施工的需要。尤其对于曲线桥更为适用。因为桥梁上施工需要的各个控制点的直角坐标值,可比较容易地在同一个坐标系中通过相同的数学模型计算得到。

全站仪架在测站点上,照准后视点,输入测站点、后视点的直角坐标值,再输入待放样点的坐标值,全站仪自动计算出放样点相对于以测站点为原点、以测站点与后视点连线为基线的极坐标值(平距及水平角度),随后的放样步骤与水中水平角和距离的放样方法相同。

## 第七节 桥涵细部施工放样

桥梁细部施工放样内容很多,不同结构形式放样方法也各异,下面主要叙述桥梁墩台细部的放样工作以及架梁时的测量工作。

涵洞的细部施工放样内容主要在于洞口的锥体护坡的放样。

## 一、桥梁细部施工放样

### 1. 明挖基础的施工放样

在地基较好、基础不深的情况下,常常采用明挖基础。

在基础开挖前,应首先根据基底尺寸、开挖深度、放坡情况等计算出原地面的开挖边线,然后根据墩台中心及其纵横轴线即可放出基坑的边线。当基坑开挖到设计标高以后,应进行基底平整或基底处理,再在基底上放出墩台中心及其纵横轴线,作为安装模板、灌注混凝土基础及墩身的依据。

注意基坑底部尺寸应根据实际情况较设计尺寸每边增加 50~100cm 的富余量,以便于支撑、排水与立模板。

基础或承台模板中心偏离墩台中心不得大于  $\pm 2\text{cm}$ ,墩身模板中心偏离不得大于  $\pm 1\text{cm}$ ,墩台模板限差为  $\pm 2\text{cm}$ ,模板上同一高程的限差为  $\pm 1\text{cm}$ 。

### 2. 桩基础的施工放样

在墩基础的中心及纵横轴线已经测设完成的情况下,可以纵横轴线为坐标轴,根据设计提供的桩与墩中心的相对位置,用支距法放出各桩的中心位置,其限差为  $\pm 2\text{cm}$ ,如图 5-1-11 所示。放出的桩位经复核后方可进行施工。对于单排桩,桩数较少,也可根据已知资料,以极坐标法放样。水中桩位或沉井位置的放样,可参照水中墩位的施工放样方法,在水中平台、围图或围堰等构造中定测桩或沉井的位置,经复测后方可进行基础施工。

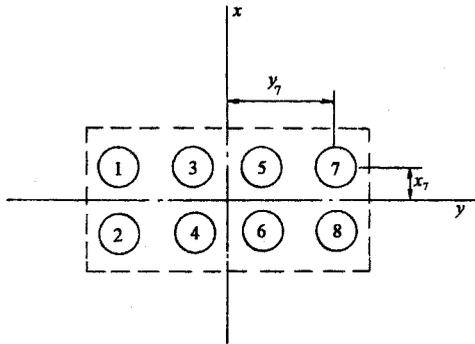


图 5-1-11 纵横轴线坐标图

### 3. 桥梁墩台的细部放样

墩身和台身的细部放样,也是主要以它的纵横轴线为依据,在立模板的外面需要预先画出它的中心线,然后在纵横轴线的护桩上架设经纬仪,照准该轴线方向上的另一护

桩 根据这一方向校正模板的位置,直至模板中心线位于视线的方向上。

在施工过程中,经常要利用护桩恢复墩、台的纵横轴线,即在墩、台身一侧的护桩上架设经纬仪,照准另一侧的护桩。但墩身筑高以后,视线被阻,就无法进行,此时,可以墩身尚未阻挡视线以前,将轴线方向用油漆标记在已成的墩身上,以后恢复轴线时可在护桩上架设仪器,照准这个标志即可。

如果桥墩位于水中,无法标示出桥墩的纵横轴线时,可用光电测距仪或交会法恢复墩中心的位置。在用光电测距仪时,墩的横轴线方向是利用桥轴线的控制桩来确定的。在桥轴线一端的控制桩上安置仪器,照准另一端的控制桩,则视线方向即为桥轴线方向,也是墩的横轴线方向(直线桥)。在此视线方向上,于墩中心附近前后各找出一一点  $a_1$  和  $a_2$  安置反光镜,测出它至控制桩的距离  $d$ ,于两点间用钢尺定出墩中心的位置,如图 5-1-12 所示。

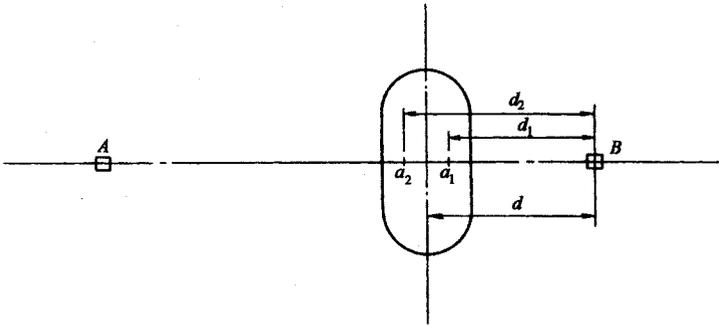


图 5-1-12 利用光电测距仪定出墩中心位置

利用交会法测设墩中心时,同前所述,应至少选三个以上的方向进行交会。误差三角形最大边在墩的下部不超过 25mm,在墩的上部不超过 15mm,取三角形的重心作为墩中心的位置。

在墩、台帽模板安装到位后应再一次进行复测,确保墩、台帽位置符合设计要求。模板位置中心的偏差不得大于 1cm,并在模板上标出墩顶标高,以便控制灌注混凝土的标高。当混凝土灌注至墩帽顶部时,在墩的纵横轴线及墩的中心处,可埋设中心标志,在纵轴线两侧的上下游埋设两个水准点,并测定出中心标志的坐标和水准点的高程,作为大致安置支撑垫石的参考依据,如图 5-1-13 所示。对于支座垫石的位置及高程的确定,由于牵涉桥梁荷载的设计和传递,应慎重对待,必须重新对其进行测量、放样,以避免误差的积累。

墩台各部分的高程,一般是通过设在墩、台身或围堰上的临时水准点来控制的,可直接由临时水准点用钢尺向上或向下量取距离来确定所需的高程,也可以采用水准仪,从

已浇注的临近墩台上设置的临时水准点测量来控制。但是在墩台顶的最后施工阶段,应该采用水准仪直接施测来控制高程。

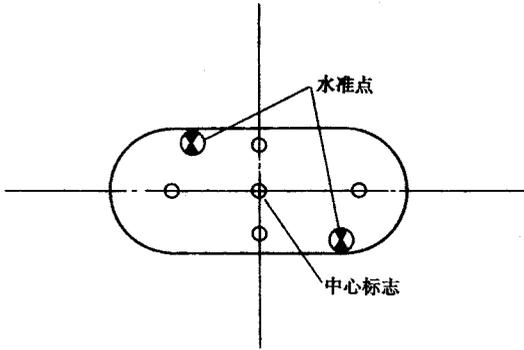


图 5-1-13 在墩顶埋设中心及水准点标志图

#### 4. 梁体施工时的测量工作

梁体施工是桥梁主体结构施工的最后道工序。桥梁上部结构较为复杂,要求对墩台方向、距离和高程以较高的精度测定。由于各种桥梁结构不同,使得施工时的控制方法各异,在此仅做粗略说明。

墩台施工时,对其中心点位、中线方向和垂直方向以及墩顶高程都作了精密测定,但当时是以各墩台为单元独立进行的。梁体施工需要将相邻墩台联系起来,考虑其相关精度,中心点间的方向、距离和高差符合设计要求。

桥梁中心线方向测定,在直线部分采用准直法,用经纬仪正倒镜观测,刻画方向线。如果跨距较大( $>100\text{m}$ ),应逐墩观测左、右角。在曲线部分,则采用测定偏角或坐标法。

相邻墩中心点间的距离用光电测距仪观测,在已刻画的方向线的大致位置上,适当调整使中心点里程与设计里程完全一致。在中心点架设经纬仪放出里程线,与方向线正交,形成墩台十字中心线。以此精确放出支座底板中心线,并以墨线弹出。

墩台顶面高程用精密水准测定,构成水准路线,附合到两岸基本水准点上。

梁体具体施工过程中的测量工作有:

(1)对大跨度钢桁架或连续梁采用悬臂或半悬臂安装架设的桥梁,在拼装架设前,应在梁顶部和底部分中点作出标志,架梁时用以测量梁体中心线与桥梁中心线的偏差值。在梁的拼装开始后,应通过不断的测量,保证梁体在正确的平面位置上。高程控制一般以大节点挠度和整跨拱度为主要控制。对需要在跨中合拢的桥梁,合拢前的控制重点应放在两端悬臂的相对位置上。

(2)对于预制安装的箱梁、板梁、T梁等,测量的主要工作在于平面位置的控制上。在架设前,应在梁顶部和底部分中点作出标志,架梁时用以测量梁体中心线与支座中心

线的偏差值。在梁体安装基本到位后,应通过不断的微调保证梁体在正确的平面位置上。

(3)对于支架现浇的梁体结构,测量的主要工作在于高程的控制上。对于支架预压前后的高程应进行连续测量,以测得弹性变形,消除塑性变形;同时应根据设计保留一定的预拱度。在梁体现浇的过程中,应对支架的变形进行跟踪测量,如果变形过大,则应暂停施工,并采取相应的措施。

(4)对于悬臂施工的梁体结构,测量的主要工作在于高程的控制上。对于挂篮预加载前后的高程应进行测量,测得弹性变形,消除塑性变形;同时在不同节段的浇注前,应根据施工图中不同节段预拱度的设计值,并结合已浇注的前一节段的高程,调整相应的预拱度,使合龙前两端悬臂的相对位置满足要求,没有积累误差。

## 二、涵洞的细部测量

涵洞中心桩位以及涵洞轴线方向测设在前面已叙及,下面就涵洞施工中锥体护坡的细部测量作简单介绍。

涵洞锥体护坡在施工时要按设计准确放样,尤其是斜交涵洞的洞口施工。

锥坡护坡及坡脚通常为椭圆形曲线,放样方法很多,如支距法、图解法、坐标值量距法、经纬仪设角法、放射线式放样法。对于斜桥锥坡还应考虑到斜度系数,可以采用纵横等分图解法进行放样。

以上方法均先求出坡脚椭圆形的轨迹线,测设到地面上,然后再按规定的边坡放出样线,据以施工。这里只对常用的支距放样法、纵横分解图法进行介绍。

锥坡支距放样法的做法是:如图 5-1-14 所示将  $b$  分为  $n$  等份(一般为 10 或 8 等份)则可求得  $i$  点对应的支距  $a_i$ ,然后根据  $i$  点在  $b$  方向的分量和在  $a$  方向的分量  $a_i$  可在现场放出  $i$  点。

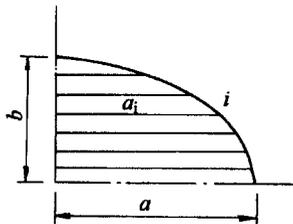


图 5-1-14 支距放样法

纵横图解法的做法是:如图 5-1-15 所示,按  $a$  和  $b$  的长度引一平行四边形,将  $a'$  和  $b'$  均分为 10 等份,并将各点顺序编号;由  $b'$  之 0 点连  $a'$  之 1 点,由  $b'$  之 1 点连  $a'$  之

2点……依此类推,最后由  $b'$  之9点连  $a'$  之10点,即形成锥坡之底线。

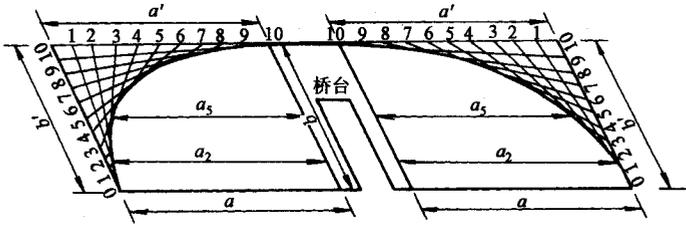


图 5-1-15 纵横图分解法

放出样线,主要是为在锥坡挖基、修筑基础以及砌筑坡面时,便于悬挂准绳,使铺砌式样尺寸符合标准。在施工过程中应随时防止样线走动或脱开样线铺砌而进行必要的检查复核工作。

## 第八节 工程监理测量验收

测量工作贯穿于整个施工过程中,其重要性不言而喻。因此对监理工作来讲,必须严格依据技术规范对每一道工序进行检查,不符合规范要求的不得进入下一道工序施工,并及时采取相应措施加以补救,以免造成不必要的浪费。

### 一、监理测量质量控制工作内容

按照我国目前所实行的质量保证体系,监理方的测量工作主要有以下内容:

1. 向承包人提供原始基准点、基准线和基准高程,并对承包人的定线控制测量进行监督检查和认可;
2. 在各项工程开工之前,对承包人的施工放线测量进行监督检查和认可;
3. 在各项工程的施工进行中,对控制工程的位值、高程、尺寸及其线型的准确性进行监督检查和认可;
4. 在各分项工程、分部工程、单位工程、工程段落或总体工程项目的中间交工和竣工验收时进行测量监查,汇总并提出各分项工程的测量成果资料。

### 二、部分控制标准

监理方对施工测量的跟踪控制主要依据设计要求、合同条款及相应的技术规范,在

此摘录了部分规范要求,其它请参阅相关规范。

### 1. 平面控制测量等级(表 5-1-4)

表 5-1-4 平面控制测量等级

等级	桥位控制测量
二等三角	> 5000m 的特大桥
三等三角	2000 ~ 5000m 的特大桥
四等三角	1000 ~ 2000m 的特大桥
一级小三角	500 ~ 1000m 的特大桥
二级小三角	< 500m 的大、中桥

### 2. 三角测量技术要求(表 5-1-5)

表 5-1-5 三角测量中误差

等级	平均边长 (km)	测角中误差(″)	起始边边长 相对中误差	最弱边边长 相对中误差	测回数			三角形最大 闭合差(″)
					DJ <sub>1</sub>	DJ <sub>2</sub>	DJ <sub>6</sub>	
二等	3.0	± 1.0	≤ 1/25000	≤ 1/120000	12	—	—	± 3.5
三等	2.0	± 1.8	≤ 1/150000	≤ 1/70000	6	9	—	± 7.0
四等	1.0	± 2.5	≤ 1/100000	≤ 1/40000	4	6	—	± 9.0
一级 小三角	0.5	± 5.0	≤ 1/40000	≤ 1/20000	—	3	4	± 15.0
二级 小三角	0.3	± 10.0	≤ 1/20000	≤ 1/10000	—	1	3	± 30.0

### 3. 桥轴线相对中误差(表 5-1-6)

表 5-1-6 桥轴线相对中误差

测量等级	桥轴线相对中误差	测量等级	桥轴线相对中误差
二等	1/130000	一级	1/20000
三等	1/70000	二级	1/10000
四等	1/40000		

### 4. 水准测量等级

2000m 以上的特大桥一般为三等,1000 ~ 2000m 的特大桥为四等,1000m 以下的桥梁为五等。

### 5. 水准测量的主要技术要求(表 5-1-7)

表 5-1-7 水准测量技术要求

等级	每公里高差中数中误差( mm )		水准仪的型号	水准尺	观测次数		往返较差、附和或环线闭合差( mm )
	偶然中误差	全中误差			与已知点联测	附和或环线	
二等	± 1	± 2	DS <sub>1</sub>	因瓦	往返各一次	往返各一次	± 4 $\sqrt{L}$
三等	± 3	± 6	DS <sub>1</sub>	因瓦	往返各一次	往一次	± 12 $\sqrt{L}$
			DS <sub>3</sub>	双面		往返各一次	
四等	± 5	± 10	DS <sub>3</sub>	双面	往返各一次	往一次	± 20 $\sqrt{L}$
五等	± 8	± 16	DS <sub>3</sub>	单面	往返各一次	往一次	± 30 $\sqrt{L}$

注 :L 为往返测段、附和或环线的水准路线长度( km )。

## 第二章 桥梁施工基本工艺控制

### 第一节 沉入桩施工

#### 一、锤击沉桩施工要点

##### (一) 试桩

除一般的中、小沉桩工程,有可靠的依据可不作试桩外,沉桩工程在施工前,应先进行试桩。

##### 1. 试桩目的

(1)根据桩的设计承载力核定桩的入土深度、确定贯入度、决定桩长及检验桩的承载力;

(2)确定桩的接头和桩尖形式;

(3)根据现场条件,选择较适宜的沉桩方法和机具设备及确定沉桩施工工艺;

(4)提供有利于沉桩工作进行的其他有关资料,如需要复打和冲击试验前的休息期限等。

##### 2. 试桩施工要求

(1)试桩宜在修建桩基的地点,可在挖至基底设计标高的基坑或试坑中进行(基坑中的试桩可作为基桩使用);

(2)试桩的材料及桩的横截面尺寸,应与设计规定相同;

(3)试桩所用沉桩机具应与沉桩实际使用的机具相同并应符合相同的技术标准;

- (4)先挖基坑后沉试桩或先沉试桩后挖基坑的施工方法,应与实际沉桩相同;
- (5)试桩应沉至设计要求的深度和计算所得的贯入度;
- (6)试桩数目

①作冲击试验的桩数,一般不得少于基桩总数的2%;一个基坑内的桩或不同类型及不同尺寸的桩,至少应有2根试桩。

②作动载试验的试桩数量不得少于基桩总数的1%,且每个基坑内或每种基桩的试桩数量不应少于2根。

③作静载试验的桩数,由桥梁基础各部分所在桩基土的差别而定。一般不少于桩的总数1%,且不少于2根。

(7)如作动载试验时,应在打完试桩后经过一定停置时间,对中砂及粗砂不小于2昼夜,粘土质及粉砂质土壤不小于10~15昼夜。

### 3. 锤击沉桩试验

(1)锤击沉桩锤的选用,可参考表(5-2-1~5-2-3)

表 5-2-1 锤击沉桩选锤参考表(一)

锤 型		单 动 汽 锤 (t)		
		3~4	7	10
锤型资料	冲击部分重(kN)	30~40	55	90
	锤总重(kN)	35~45	67	110
锤冲击力(kN)		~2300	~3000	3500~4000
常用冲程(m)		0.6~0.8	0.5~0.7	0.4~0.6
适用的桩规格	预制方桩、管桩的边长或直径(cm)	35~45	40~45	40~50
	钢管桩直径(cm)			
粘性土	一般进入深度(m)	1~2	1.5~2.5	2~3
	桩尖可达到静力触探 $P_s$ 平均值(MPa)	30	40	50
砂 土	一般进入深度(m)	0.5~1	1~1.5	1.5~2
	桩尖可达到标准贯入击数N值	15~25	20~30	30~40
岩 石 (软质)	桩尖可进入深度 (m)	强风化	0.5	0.5~1
		中等风化		表层
锤的常用控制贯入度(cm/10击)		3~5		
设计单桩极限承载力(kN)		600~1400	1500~3000	2500~4000

注 ①适用于预制桩长度20~40m,钢管桩长度40~60m,且桩尖进入硬土层一定深度;不适用于桩尖处于软土层的情况;

②本表仅供选锤参考,不能作为设计确定贯入度和承载力的依据;

③标准贯入击数N值,为未经修正的数值;

④锤击沉入达不到要求深度时,可用射水配合沉桩。

表 5-2-2 锤击沉桩选锤参考表(二)

技 术 规 格		双 动 汽 锤		
		9-B-3	10-B-3	11-B-3
冲击动能 N·m/每分钟冲击数		11800/145	22800/130	26000/95
		11000/140	17800/105	24800/90
		10200/135	16300/100	23700/85
冲击部分重力(kN)		7260	13620	22700
锤总重力(kN)		31800	49200	63500
额定冲程(cm)		43.2	48.3	48.3
锅炉功率(J/s)		33097	36775	44130
压缩空气需要量(m <sup>3</sup> )		17.0	21.2	25.5
管道直径(mm)		51	64	64

注 本表所列锤型为美国 Mck-Terry 生产,仅供参考。

表 5-2-3 锤击沉桩选锤参考表(三)

锤 型		柴 油 锤 (t)				
		1.8	2.5	3.2	4	7
锤型资料	冲击部分重(kN)	18	25	32	46	72
	锤总量(kN)	42	65	72	96	180
锤冲击力(kN)		~2000	1800~2000	3000~5000	4000~5000	6000~10000
常用冲程(m)		1.8~2.3				
适用的 桩规格	预制方桩、管桩的边长或直径(cm)	30~40	35~45	40~50	45~55	55~60
	钢管桩直径(cm)	φ40			φ60	φ90
粘性土	一般进入深度(m)	1~2	1.5~2.5	2~3	2.5~3.5	3~5
	桩尖可达到静力触探 P <sub>s</sub> 平均值(MPa)	3.0	4.0	5.0	>5.0	>5.0
砂 土	一般进入深度(m)	0.5~1	0.5~1	1~2	1.5~2.5	2~3
	桩尖可达到标准贯入击数 N 值	15~25	20~30	30~40	40~45	50
岩 石 (软质)	桩尖可进入深度(m)	强风化	0.5	0.5~1	1~2	2~3
		中等风化		表层	0.51	1~2
锤的常用控制贯入度(cm/10击)		2~3			3~5	48
设计单桩极限承载力(kN)		402~1200	800~1600	2000~1600	3000~5000	5000~10000

注 ①适用于预制桩长度 20~40m,钢管桩长度 40~60m,且桩尖进入硬土层一定深度,不适用于桩尖处于软土层的情况;

②标准贯入击数 N 值,为未经修正的数值;

③本表仅供选锤参考,不能作为设计确定贯入度和承载力的依据;

④锤击沉入达不到要求深度时,可用射水配合沉桩。

## (2) 试验程度:

①用坠锤、单动汽锤时；

A. 使用蒸汽锤时，预先将汽锤加热；

B. 记录每下沉 1.0m 的锤击数和全桩的总锤击数；

C. 记录最后 1.0m 左右每下沉 10cm 的锤击数；

D. 最后加打 5 锤，记录桩的下沉量，算出每锤平均值（以 mm 计），作为停锤贯入度。

②用柴油锤、双动汽锤时；

A. 使用蒸汽锤时，预先将汽锤加热；

B. 记录每下沉 1.0m 的锤击时间和全桩的总锤击时间；

C. 在最后 1.0m 左右时，记录每 10cm 的锤击时间；

D. 取最后 10cm 的每分钟平均值（以 mm 计），作为停锤贯入度。

(3)最终贯入度的取值：

对于坠锤、单动汽锤，取复打最后 5 锤的平均值；对于柴油锤、双动汽锤，取复打最后锤击 10cm 所需时间每分钟的平均值。

(4)复打应用停锤时同一设备及同一落锤高度。弹性衬垫的状态也应尽量与停锤时相近。复打应达到的贯入度要小于或等于停打贯入度。

(5)复打应经“休息”后进行。“休息”时间按土质不同而异，可由试验确定，一般不少于下列天数：

①桩穿过砂类土、桩尖位于大块碎石土、紧密的砂类土或坚硬的粘性土上，不少于 1d；

②在粗、中砂和不饱和粉细砂里，不少于 3d；

③在粘性土和饱和的粉细砂里，不少于 6d。

(6)锤击沉桩试验的结果，应详记在打桩记录中，并注明试桩的所有尺寸，打桩锤的特点及附有打桩地点平面图与地质断面图。

#### 4. 振动沉桩试验

(1)选择振动沉桩桩锤。

(2)试验程序：

①记录每下沉 1m 的振动时间和全桩的总振动时间；

②在最后 1m 左右时，记录每 10cm 的振动时间；

③取最后 10cm 的每分钟平均值（以 mm 计），作为停振贯入度；

最终贯入度的取值：

取复振最后振动 10cm 所需时间每分钟的平均值。

④复振“休息”时间及要求与本款内“锤击沉桩试验”中 3-(5) 3-(4) 规定相同。

⑤ 振动沉桩试验的结果,应详记在打桩记录中,并注明试桩的所有尺寸,打桩锤的特点及附有打桩地点平面图与地质断面图。

### 5. 静压试验

静压试验的目的是确定试桩的单桩承压能力,荷载与位移和时间的关系。

试桩需加作静压试验时,应在锤击或振动试验以后立即进行。静压试验方法可参见《公路桥涵施工技术规范》JTJ041-89 附录 4-1。

## (二) 沉桩

### 1. 沉桩前准备工作

#### (1) 备好下列资料

- ① 沉桩地区的地质和水文资料;
- ② 沉桩工艺施工方案;
- ③ 试桩资料。

(2) 核验沉桩的尺寸和质量,并在每根桩的一侧用油漆划上长度标记(便于随时检查沉桩入土深度);

#### (3) 立桩和桩定位

① 预制混凝土桩吊点选择有三种情况:

A. 一点吊的位置,见图 5-2-1。

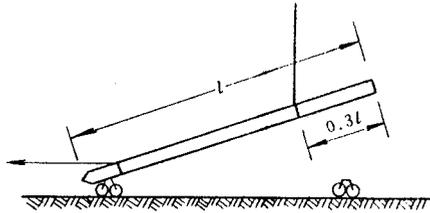


图 5-2-1 混凝土桩一点吊起吊

B. 两点吊:要求两点同时受力,见图 5-2-2。

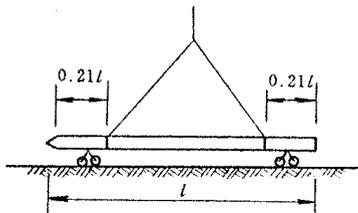


图 5-2-2 混凝土桩两吊点起吊

C. 两点以上吊点,要求各点同时受力,见图 5-2-3。

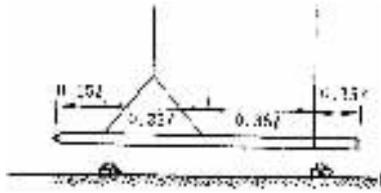


图 5-2-3 混凝土桩两吊点以上起吊

②桩位定线时,应将所有的纵横向位置固定牢固,如桩的轴线位置于水中,应在岸上设置控制桩。

③打钢筋混凝土桩时,应采用与桩的断面尺寸相适应的桩帽。桩就位后如发现桩顶不平应以麻袋等垫平。

(4)桩锤压住桩顶后,应检查锤与桩的中心线是否一致,桩位、桩帽有无移动,桩的垂直度或倾斜度是否符合规定;

(5)检查所有机具,做到安全、可靠。

(6)桩锤选用,参见表 5-2-1。

(7)下沉空心桩时,若下端有射水孔时应予堵塞,以防水和泥砂进入桩心。

## 2. 沉桩

(1)开始打桩时应先锚桩,并调正桩的垂直度,待入土到一定深度,桩尖不易活动时,即可开始正常打桩。如中间发现桩位走动,应立即采取校正措施。

(2)沉桩开始,必须控制桩锤冲击能:

①坠锤或单动汽锤的落距不宜大于 0.5m;

②柴油锤先不供燃料仅作控制性单次锤击;

③双动气锤宜小开汽门以减少每分钟锤击数;

(3)当桩入土达到一定深度、位置正常后,再按要求的落距或锤击频率进行:

①钢筋混凝土桩、预应力混凝土桩采用坠锤时,最大落距不得大于 2m;

②采用单动汽锤时,不宜大于 1m;

③采用柴油锤时,应使锤芯冲程正常。

(4)锤击沉桩应采用重锤低击,在锤击过程中,如桩顶出现局部变形或损坏,应及时修复。环境温度低于  $-10^{\circ}\text{C}$  时,应尽量避免钢管桩锤击作业。

(5)沉桩过程中,应始终注意锤、桩帽和桩保持在同一轴线上;不得采用顶、拉桩头或桩身办法纠偏。

(6)沉入群桩时,应自其中心开始,逐次向四周进行。在软塑性土地区时,当每一基桩下沉完毕后,应测量其桩顶标高,待全部基桩均下沉完毕后,应再测量各桩的标高,以检查桩顶是否有隆起现象。

## 3. 控制贯入度

(1) 桩的贯入度应在桩下沉接近完毕,并在下列正常条件下测定:

- ① 桩头没有破坏;
- ② 桩锤的冲击力作用在桩的中心;
- ③ 桩锤冲击部分的下落高度符合规定;
- ④ 汽锤在冲击中,需有足够的气体压力。

(2) 贯入度试验与计算

- ① 贯入度试验的时间要求:打桩至设计标高后,进行贯入度检验。
- ② 最后贯入度计算公式(自落锤、单动汽锤、柴油打桩机),见公式(5-2-1)。

$$e = \frac{nFQH}{m_p(nF + m_p)} \times \frac{Q + 0.2(q + q_1)}{Q + q + q_1} \quad (5-2-1)$$

式中  $e$ ——最后贯入度(每次锤击桩的贯入深度)(cm);

$n$ ——根据基桩的材料和打桩的方法所决定的系数,见表5-2-4;

$m$ ——安全系数,对临时建筑物为1.5,永久建筑物为2;

$F$ ——桩的断面面积( $\text{cm}^2$ )(单根木桩即为大小头平均面积);

$Q$ ——锤重(kg)(如为自落锤即全重,单动汽锤和柴油打桩机取其冲击部分的重量);

$p$ ——桩的设计载重(kg);

$q$ ——桩重(kg);

$q_1$ ——锤垫重(kg);

$H$ ——落锤高度(cm)。自落锤和单动汽锤为自由落下时,其落锤高度即为实际数值,如自落锤落下而不与钢索脱开,则实际作用的高度( $H$ )值,应乘以0.7~0.8的系数。

表5-2-4  $n$  的数值

桩 种	打 桩 方 法	$n$ 值(MPa)
木 桩	有锤垫	0.8
木 桩	无锤垫	1
钢筋混凝土桩	有桩帽	1.5

③ 双动汽锤最后贯入度计算公式,用双动汽锤时,其最后贯入度可按公式(5-2-2)

求算:

$$P = \frac{W}{70(e + 0.25)} \quad (5-2-2)$$

式中  $P$ ——桩的允许载重( t )(安全系数等于 2 时);

$W$ ——一次冲击能(  $\text{kg} \cdot \text{m}$  )

$e$ ——最后贯入度(  $\text{cm}$  ), 用下公式( 5-2-3 )计算。

$$e = \frac{W}{70P} - 0.25 \quad (5-2-3)$$

④柴油打桩机的落锤高度按公式( 5-2-4 )折算,

$$H_1 = 100 W / Q \quad (\text{cm}) \quad (5-2-4)$$

式中  $W$ ——一次的冲击能, 参见表 5-2-5;

$Q$ ——锤重(  $\text{kg}$  );

$H_1$ ——落锤高度(  $\text{cm}$  )。

表 5-2-5 柴油打桩机锤冲击能

柴油打桩机锤型		冲击部分重量 ( $\text{kg}$ )	冲击能 $J$ 时的最后贯入度( $\text{mm}$ )			
			0	1	3	5
导杆式	CDM ~ 1	450	2490	2600	2850	3080
	CDM ~ 2	600	2540	3100	3410	3720
	( 60 )带有展长导杆	600	3940	4110	4430	4740
	( 1200 )	1200	7930	8170	8650	9150
	( 1800 )	1800	11800	12130	12780	13440
	管筒式 YP - 500	500	5240	5410	5760	6100

( 3 )沉桩中每锤的贯入度, 应取一阵锤击中的平均值, 自落锤每 20 锤为一阵, 单动汽锤每 10 锤为一阵, 双动汽锤及柴油打桩机采用每分钟锤击次数的贯入平均值作为每锤的贯入度。只有在求桩的复打贯入度时, 可每三锤记录一次。

( 4 )沉桩过程中应随时注意桩的贯入度有无骤变情况, 如发现有桩锤回跃, 桩身颤动和倾斜, 桩顶破裂加剧等现象时, 应即采取相应的技术措施。

( 5 )严格掌握停锤控制标准:

①设计桩尖标高处为硬塑粘性土、碎石土、中密以上的砂土或风化岩等土层时, 可根据贯入度变化并对照地质资料, 确认桩尖已沉入该土层, 且贯入度达到控制贯入度时, 即可停锤;

②当贯入度已达到控制贯入度, 而桩尖标高未达到设计标高时, 应继续锤入 10 $\text{cm}$  左

右(或锤击 30~50 击),如无异常变化时,即可停锤;若桩尖标高比设计规定标高高得多时,应报有关部门研究确定;

③设计桩尖标高处为一般粘性土或其他较松软土层时,应以标高控制,贯入度作为校核,当桩尖已达设计标高,而贯入度仍较大时,应继续锤击,使其贯入度接近控制贯入度;

④在同一桩基中,各桩的最终贯入度应大致接近,而沉入深度不宜相差过大,避免基础产生不均匀沉降;如因土质变化太大,致使各桩贯入度或沉入深度相差过大时,应报有关部门研究,另行确定停锤标准;

#### 4. 桩头截除方法

(1)木桩可用大板锯截锯桩头;

(2)钢管桩可用氧炔焰截除桩头;

(3)钢筋混凝土管桩截除桩头时,不宜用大锤硬砸(易震出裂缝),宜先用钢抱箍或木抱箍将桩身在截锯处下面箍紧,沿箍用小锤凿开一条沟槽,然后将沟槽扩大加深,切断桩头。

5. 沉入桩的施工记录应做到准确、完整。其格式参见表 5-2-6 和表 5-2-7。

表 5-2-6 \_\_\_\_\_ 桥 \_\_\_\_\_ 号墩(台)沉桩记录

第 \_\_\_\_\_ 页 共 \_\_\_\_\_ 页

第 _____ 号基桩、桩长: _____ + _____ + _____ + _____ + _____ = _____ m										
基桩类别 桩断面 _____ cm <sup>2</sup> 系 _____ 桩,直(斜)桩										
打桩时 <sup>地面</sup> 标高: _____ m <sub>河床</sub>										
桩尖类型: _____ 桩锤类型: _____										
月 日	工作 项目	起 时 分	止 时 分	锤击 次数 (次)	落锤 高度 (cm)	射水水压 (MPa)	下沉量(cm)		桩尖 标高 (m)	附注(沉桩情况及有关现象的记述)
							本次下沉	累计下沉		

记录 \_\_\_\_\_ 复核 \_\_\_\_\_ 主管工程师 \_\_\_\_\_

注:下沉中的不正常情况应分析原因记入附注栏。

- ①锤的冲击力作用于桩的中轴上;
- ②锤的冲击部分下落高度符合有关规定;
- ③双动汽锤开足规定的气压,达到每分钟规定的锤击次数。



再进行复打。

(6)管桩下沉到位后,如设计需要以混凝土填芯时,应用吸泥等法清除泥渣以后,用水下混凝土填芯。在受到管外水压影响时,管桩内的水头必须保持高出管外水面 1.5m 以上。

(7)冬季施工时,应以防寒材料如草袋、草绳、锯末、麻袋等包扎射水管路,在停止射水时及时开启放水阀,排净管内存水。如遇严寒,应特别注意阀门部位,可用小火、电炉不停地烘烤,以防冻裂。管桩内亦应及时排出积水随即填充混凝土,否则应采取防冻措施。

(8)严冬深夜施工时应加强照明。桩架上工作平台,以及桩架附近的脚手板应铺设草垫防止滑倒。

### 三、振动沉桩施工要点

#### (一)选锤

选择振动沉桩机锤时,可参考下列公式 5-2-5,且应验算振动上拔力对桩身结构的影响。

振动锤的振动力  $P$  应能克服桩在下沉中土的摩阻力( $R$ ):

$$P > R \quad (5-2-5)$$

#### 1. 土的摩阻力

$$R = fuL \quad (kN) \quad (5-2-6)$$

式中  $f$ ——土单位面积的动摩阻力(kPa),可按表 5-2-8 选用;

$u$ ——桩的周边长度(m);

$L$ ——桩的入土深度(m)。

#### 2. 振动锤的振动力(kN)

$$p = 0.04n^2 M (kN) \quad (5-2-7)$$

式中  $n$ ——偏心锤转速(r/s);

$M$ ——振动锤的偏心力矩(kN·cm)。

但偏心力矩  $M$  应满足下式(5-2-8)

$$M = AQ \quad (5-2-8)$$

式中  $A$ ——振幅,在软土地基中, $A > 0.7\text{cm}$ ;

在其他地基中, $A \geq 1.1\text{cm}$ ;

$Q$ ——桩和锤总重力(kN)。

表 5-2-8  $f$  值

砂 性 土		粘 性 土	
标准贯入击数	$f$ (kPa)	标准贯入击数	$f$ (kPa)
0~4	10	0~2	10
4~10	10	2~4	10
10~30	20	4~8	20
30~50	20	8~15	25
>50	40	15~30	40
		>30	50

## (二) 沉桩

(1) 稳放机具,应使振动沉桩机、机座、桩帽连接牢固;

(2) 开始沉桩时宜用自重下沉或射水下沉,待桩身稳定后,再采用振动下沉;

(3) 振动时间的控制

① 根据土质情况和振动机能力大小,并通过实际试验,确定每次振动时间,一般不宜超过 10~15min。

② 在有射水配合时,振动持续时间可以缩短。当振动下沉速度由慢变快时,可继续振动;由快变慢,如下沉速度小于 5cm/min 或桩头冒水时,应立即停振;当振幅过大(通常不应超过 14~16mm)而桩不下沉时,表示桩尖端土层很坚实或桩接头已振松,应立即停振,可继续射水或另作处理。

③ 对于停振后的射水时间也应适当控制,过短影响下沉,过长费电。应根据已沉基桩的下沉量与振动射水时间关系比较,积累经验,得出适宜的控制时间。

## (三) 沉桩停振控制标准

(1) 应以通过试桩验证的桩尖标高控制为主,以最终贯入度(cm/min)或可靠的振动承载力公式计算的承载力作为校核;

(2) 如桩尖已达标高而最终贯入度或计算承载力相差较大时,应查明原因,报请研究后另行确定。

## 四、压桩施工要点和注意事项

### (一) 压桩施工要点

1. 准备工作

(1) 确定压桩阻力;

(2) 选用压桩设备、辅助机具和测试仪表等;

(3) 机具设备安装,应按机具技术规定安装,并应进行试运行检查校验,如钢丝绳、通

电线路、高压油管管路系统等；

(4) 轨道验算 对压桩机行走轨道地基应予以处理,事先做必要的验算,使允许承载力满足要求。

## 2. 压桩

(1) 力的作用线保持重合 压桩前和过程中,应经常检查反力梁中轴线加压的合力作用线与桩帽、桩身、送桩的中轴线保持互相重合；

(2) 连续施工 压桩开始后应连续施工,减少行歇次数和时间,桩尖接近设计标高时,应严格控制进程；

(3) 多节压桩需要接桩时,接桩面应距地面 1m 以上,以便于操作；

(4) 经常校验压力表 因桩沉入高度常以设计标高或允许静压力值控制,因此,压力表指示值必须正确。

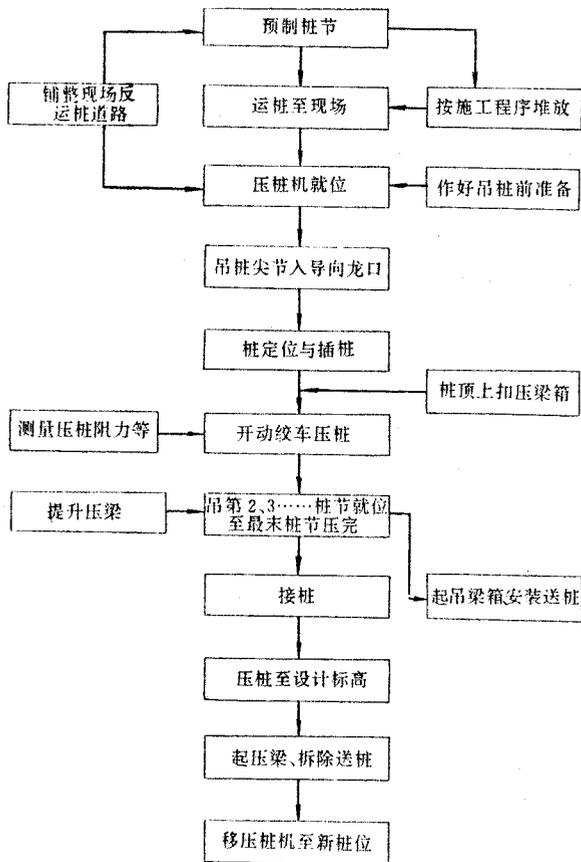


图 5-2-4 压入分段桩施工程序

## 第二节 钻孔施工

### 一、冲击钻机钻孔

#### (一) 开孔(冲孔)

(1) 开孔前,应先向护筒内灌注泥浆,或直接加入粘土块,用冲击锥十字形钻头以小冲程反复冲击造浆。如地表土层为砂或砂卵石等松散土层时,可按 1:1 的比例投入粘土和小片石(粒径不大于 15cm);用冲击锥十字形钻头以小冲程反复冲击,使泥膏、片石挤入孔壁,必要时须重复回填、反复冲击 2~3 次,以加固护筒下脚。

(2) 孔内水位应高于护筒下脚 0.5m 以上,以免水面荡漾损坏护筒脚孔壁;应比护筒顶至少低 0.3m,以防泥浆溢出,还应比地下水位高出 1.5~2.0m。

(3) 开孔时,遇有流砂现象时,宜加大粘土减少片石的比例,按上述办法进行处理,以求孔壁坚实。

(4) 开孔阶段要随时检查孔位,务必将冲击中心对准桩孔中心。

(5) 一般在护筒下 3~4m 范围内冲孔时,可按表 5-2-9 的参数控制。

表 5-2-9 开孔 3~4m 范围内控制参数

土质	提锤高度(cm)	冲击次数(次/min)	泥浆相对密度
土	40~60	20~25	1.4~1.5
砂砾	40~60	20~25	1.5~1.7

当开孔在 3~4m 范围内,可不掏渣,以便石渣泥浆尽量挤入孔壁周围空隙加固孔壁。

#### (二) 钻进

##### 1. 钻进方法

在不同的地层应采取不同的冲击方法和措施。

(1) 冲程应根据土层情况确定:

① 一般在紧密的砂、砂砾石、砂卵石及砾石、卵石粒径较大的土层中钻进,宜采用高冲程(100cm)。

② 在松散的砂、砂砾石或砂卵石土层中钻进,宜采用中冲程(约为 75cm)。冲程过高对孔底振动大,易引起坍孔。

③ 在粘性土、亚粘土、轻亚粘土中钻进,宜采用中冲程。

④在易坍塌或流砂地段宜用小冲程,并应提高泥浆的粘度和密度。

(2)松放钢丝绳应根据土层松、密、软、硬程度和进尺情况,均匀松放。

①一般在松、软地层每次可松绳 5~8cm。

②在密实坚硬土层每次可松绳 3~5cm。

③应注意防止松绳过少,形成“打空锤”,使钢丝绳、钻机受到意外荷载,造成钻机损坏。松绳过多,则会减少冲程,降低钻进速度,严重时使钢丝绳扭曲、纠缠发生事故,同时也会使钻头顶端摇摆,撞击孔壁造成坍孔。

(3)通过漂石层或岩层时,如其表面不平整,应先投入粘土、小片石,将其表面垫平,再用十字形钻头绷紧大绳,低锤快打,松绳长度宜根据冲击进尺掌握,每次应小于 3~5cm。待冲平岩面后,可加大冲程钻进。以防止发生斜孔、坍孔事故。

## 2. 泥浆质量密度的选择

(1)在砂及砂卵石地层冲进,泥浆相对密度应大些,可用 1.5 左右。

(2)在粘土层冲进时,因孔中粘土能自行造浆,故可只加清水。

(3)在基岩中冲进时,泥浆相对密度以满足浮渣为度,约为 1.3 左右。太小则不利于浮渣,太大增加冲锥的阻力。

## 3. 掏渣

(1)掏渣间隔:正常钻进每班至少应掏渣一次,一般在密实坚硬土层,每小时纯钻进小于 5~10cm、在松软地层,每小时纯钻进小于 15~30cm 时,即应进行掏渣。也可以每进尺 0.5~1.0m 掏渣一次。

(2)掏渣标准:掏至泥浆内含渣显著减少,无粗颗粒,相对密度恢复正常为止。

(3)在松软土层,用管锥钻进比十字形冲击钻头快,故掏渣应较勤,一般锥管装满钻渣后即应提锥倒渣。

(4)掏渣后,应及时向孔内添加泥浆或清水,以保持水头。

## 4. 分级钻进

为了适应钻机负荷能力,在钻大孔时,可采取分级扩钻的方法,达到设计孔径。

(1)当用十字形锥头钻 150cm 以上孔径时,一般分两级钻进,第一级锥头直径可为设计孔径的 0.4~0.6 倍。

(2)当用管锥钻 70cm 以上孔径时,一般分 2~4 级钻进。

(3)分级钻进,会使大粒径的卵石掉入先一级钻成的小孔中,造成扩钻困难,为此,可在小孔钻成后向小孔填泥块到 1/3~1/4 孔深处,再开始下一级的钻进。一般先钻的孔只宜超前数米,随后即钻次级的孔(如超前过深,将使先钻的孔淤塞),这样钻小孔与扩孔交替进行到设计孔深为止。

### (三)成孔

(1)当测量孔底已达到设计标高后,可停止冲击,进行成孔检查。孔径要符合设计要求,孔深一般应较设计深度加深0.6m。

(2)成孔检查合格后,应迅速清孔。

(3)及时吊放钢筋骨架和灌注混凝土。否则应随时护壁并保持孔内水头高度。

### (四)劳动组织

一般每班3~4人。其中司机1人,电焊工1人,加泥浆或粘土、补水、协助倒渣并兼做记录2人。

## 二、螺旋钻机钻孔

### (一)钻机就位

钻机运到桩位处,支起腿子,拆掉车轮,将钻机调平、对中(对准桩位中心),立起臂杆(导杆)固定斜撑,使斜撑上端与导杆顶部相连,下端与底盘相连。将护筒稳于桩位上并对中整平,落下钻杆准备钻进。

### (二)钻进

(1)启动主机试运转后即可正式钻进,钻头入土后,钻渣即沿螺旋叶片上升从护筒顶部的溜槽溜入运输车内。正常钻进时边钻进边出渣。钻到设计标高后,边旋转边提钻杆边清渣,将钻杆全部提出。

(2)检查孔径及孔深,符合要求后,移开钻机即可吊装钢筋骨架和灌注混凝土。

## 三、正循环回转钻机钻孔

### (一)钻机就位

(1)立好钻架并调整和安设好起吊系统,将钻头吊起,徐徐放进护筒内。

(2)启动卷扬机把转盘吊起,垫方木于转盘底座下面,将钻机整平并对准钻孔。

(3)装上转盘,要求转盘中心同钻架上的起吊滑轮在同一铅垂线上,钻杆位置偏差不得大于2cm。

(4)在钻进过程中要经常检查转盘,如有倾斜或位移,应及时纠正。

(5)在方钻杆上端安装提引水龙头,在水龙头上端连接输浆胶管,将输浆胶管接到泥浆泵,把提引水龙头吊环挂到起吊系统的滑轮吊钩上。

(6)取走转盘中心的方形套,启动卷扬机吊起方钻杆穿过转盘并牢固地联结到钻头,装好方形套夹住方钻杆,准备钻进。

### (二)初钻

(1)先启动泥浆泵和转盘,使之空转一段时间,待泥浆输进钻孔中一定数量后,方可

开始钻进。

(2)接长钻杆时,先卸去方形套,提升方钻杆达到钻头与钻杆相连处露出转盘为止。用钻杆夹持器卡位钻头,并支承于转盘,卸去方钻杆。然后吊起一节圆钻杆,连接于钻头,卸去夹持器,把圆钻杆连同钻头放入钻孔,当圆钻杆上端接近转盘时,照上述用夹持器支持圆钻杆,松吊绳,将方钻杆吊来与钻杆联结,撤去夹持器,把方钻杆降入转盘内并安好方形套,继续钻进,以后需再接长钻杆时,照以上步骤在方钻杆同圆钻杆之间加接圆钻杆就可以了,一直钻孔到需要深度为止,卸去时亦同样办理,只是把接长改为减短而已。

(3)接卸钻杆的动作要迅速、安全,争取在短时间内完成,以免停钻时间过长,增加孔底沉淀。

### (三)钻进时操作要点

(1)开始钻进时,进尺应适当控制,在护筒刃角处,应低档慢速钻进,使刃角处有坚固的泥皮护壁。钻至刃角下1m后,可按土质以正常速度钻进。如护筒土质松软发现漏浆时,可提起钻锥,向孔中倒入粘土,再放入钻锥倒转,使胶泥挤入孔壁堵住漏浆孔隙,稳住泥浆继续钻进。

(2)在粘土中钻进,由于泥浆粘性大,钻锥所受阻力也大,易糊钻。宜选用尖底钻锥、中等转速、大泵量、稀泥浆钻进。

(3)在砂土或软土层钻进时,易坍孔。宜选用平底钻锥、控制进尺、轻压、低档慢速、大泵量、稠泥浆钻进。

(4)在轻亚粘土或亚粘土夹卵、砾石层中钻进时,因土层太硬,会引起钻锥跳动蹩车、钻杆摆动加大和钻锥偏斜等现象,易使钻机超负荷损坏。宜采用低档慢速、优质泥浆、大泵量、两级钻进的方法钻进。

(5)两级钻进时,第一级钻锥底面积可取钻孔面积的一半,其钻锥直径可按公式5-2-9计算:

$$d = \frac{D}{1.40} \quad (5-2-9)$$

式中  $d$ ——第一级钻锥直径(cm);

$D$ ——第二级钻锥直径(cm);

(6)钻进过程中,每进尺5~8m,应检查钻孔直径和竖直度,检查工具可用圆钢筋笼(外径 $D$ 等于设计桩径,高度为3~4 $D$ ),吊入孔内,圆笼中心使与钻孔中心符合,如上下各处均无挂阻,则说明钻孔直径和竖直度符合要求。

### (四)劳动组织

每班一般配7~9人,其中班长兼指挥、记录1人,司机1人,卷扬机司机1人,泥浆

泵机电工 1~2 人,装卸钻杆及清渣 3~6 人。

#### 四、泵吸式反循环回转钻机钻孔

##### (一) 钻机就位

与正循环回转钻机基本相同。

##### (二) 开钻

(1)为防止堵塞钻头的吸渣口,应将钻头提高距孔底约 20~30cm,将真空泵加足清水(为便于真空泵启动,不得用脏水),关紧出水控制阀和沉淀室放水阀使管路封闭,打开真空管路阀门,使气水畅通,然后启动真空泵,抽出管路内的气体,产生负压,把水引到泥石泵,通过沉淀室的观察窗看到泥石泵充满水时,关闭真空泵,立即启动泥石泵。

(2)当泥石泵出口真空压力达到 0.2MPa 以上压力时,打开出水控制阀,把管路中的泥水混合物排得沉淀池,形成反循环后,启动钻机慢速开始钻进。

(3)打开出水控制阀后,若压力减到 0.2MPa 以下时,可关闭出水控制阀,减少排量。或者在操作中反复启闭控制阀门以提高泵内压力。

##### (三) 接长钻杆

当一节钻杆钻完时,先停止转盘转动,并使反循环系统延续工作至孔底沉渣基本排净(约需 1~3min),然后关闭泥石泵接长钻杆,在接头法兰盘之间垫 3~5mm 厚的橡胶圈,并拧紧螺栓,以防漏气、漏水,然后如上述工序,一切正常后继续钻进。

##### (四) 控制钻速

(1)在硬粘土中钻进时,用一档转速,放松起吊钢丝绳,自由进尺。

(2)在普通粘土、砂粘土中钻进时,可用二档、三档转速,自由进尺。

(3)在砂土或含少量卵石中钻进时,宜用一、二档转速,并控制进尺,以免陷没钻头或抽吸钻渣的速度跟不上。

(4)遇地下水丰富容易塌孔的粉砂土,宜用低档慢速钻进,减少钻井对粉砂土的搅动,同时应加大泥浆比重和提高水头,以加强护壁防止塌孔。

##### (五) 劳动组织

每台班约需 12~13 人,其中操纵钻机技工 3 人,拆装钻杆 4 人(内含技工 1 人),运钻杆及调制泥浆 3 人(内含技工 1 人),供水 2 人及指挥记录 1 人。操作熟练后人数可减少。

#### 五、空气吸升式反循环回转钻机钻孔

##### (一) 钻机就位

一般空气吸升式反循环回转钻机是钻深孔的。

(1) 钻机安装在平台主桁架上。钻机安装的平面位置和水平要求与泵吸式的相同,因单侧出渣管较大较重,要消除偏心荷载对提引水龙头密封结构的不利影响,可在水龙头出口端加一吊点,向上提吊,以保持钻杆的竖直。

(2) 要多检查电动机的电源线,防止错接。

(3) 应对供浆、供风系统等逐一检查,完善后,方可开钻。

## (二) 初钻的措施

空气吸升式必须下端钻锥钻杆埋入水(泥浆)中一定的深度,即在孔底泥浆的压强和钻杆底泥浆、空气混合体的压强基本相等的条件下,才能吸引浆渣上升。为了达到这一要求,有三种措施可供选择:

(1) 先用正循环开孔,钻进到一定深度再改用反循环钻进。

(2) 将护筒接高,护筒顶高于原地面到应有的高度,再用泵向接高的护筒中送泥浆。至达到实现正常的反循环自流补浆时,再取出钻锥,消除粘在钻锥上的粘性土块,拆除有关管路和接高的护筒。

(3) 在排渣管口处装设负压喷射头,靠高压水或高压空气通过形成负压腔,而使泥浆钻渣由钻杆中吸出,它是弥补空气吸升式反循环在水深不足 6~8m 时吸出泥浆钻渣的一种较为简易有效的设备。空压机仍可用原来的,只需在排渣管口另加一个喷射头即可。

## (三) 操作要点与注意事项

(1) 空气吸升式反循环回转钻正常钻进的操作要点基本上与泵吸式的相同。

(2) 须注意空压机送风与钻锥回转同时进行,接钻杆时,须将钻杆稍稍提升 30cm 左右,先停止钻锥回转,然后送风数分钟,将孔底钻渣吸尽,再放下钻锥,进行拆、装钻杆工作,以免钻渣沉淀而发生埋锥事故。

(3) 随时注意护筒口泥浆(水)面标高,如果逐渐往下降落时,须立即用水泵补水入护筒,以免因水头不够而发生坍孔事故。

## 六、全套筒式冲抓钻孔机钻孔

全套筒式冲抓钻孔机钻孔也称贝诺特法。

### (一) 钻机就位

在钻孔之前,按规定要求,安置钻机就位,垫好垫板,将各支点下的液压千斤顶顶紧底座,使行走装置的重量也作用于装拆管装置,充分发挥其反力作用。

### (二) 钻进

(1) 先用冲抓锥在钻孔位置抓出浅孔,吊入带有切削齿的第一节套管,使用夹紧和压入套管的装置,将套管左右摇动并压入土中,再用冲抓锥抓出孔内砂土(或先下第一节套

管强力旋压入土再行冲抓),第一节下到位后吊接第二节套管,用锁销螺栓固牢再继续冲抓出土和压旋套管入土,重复进行,依此接入第三节和以后的各节套管,直到预定的标高。

(2)套管的拔出与拆除,是随混凝土的浇注而进行的,即随浇注一定高度的混凝土,而拔出一定高度的护筒,逐渐拔到锁销螺栓露出适当高度时,卸下销栓,拆掉一节套管,以后重复进行,直到混凝土桩浇注完成,套筒也全部拔出了。

### 第三节 墩台施工

#### 一、整体式墩台施工

##### (一)石砌墩台

在石料丰富的地区,采用石砌墩台可以节省大量的水泥,而且经久、耐用。

石砌墩台应采用石质均匀、不易风化无裂缝的石料,其强度不得低于设计要求。石料精凿加工,水泥、砂、水等材料均应符合施工规范和设计要求。

墩台砌筑前应按设计图放出大样,按大样图用挤浆法分段砌筑(图 5-2-5)。砌筑时还应计算砌筑层数,选好石料,严格控制平面位置和高度。镶面石一顺一丁排列,砌缝横平竖直,缝宽不大于 2cm,上下层竖缝错开距离不小于 10cm。里层可按块石砌筑,其平缝宽度不大于 3cm,竖缝宽度不大于 6cm,上下层竖缝应错开。

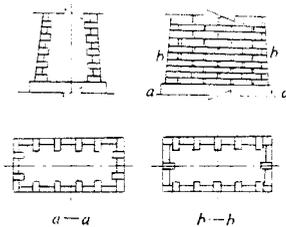


图 5-2-5 石砌墩台

砌石时所采用的施工脚手架应环绕墩台搭设,用以堆放材料,并支承施工人员砌镶面定位行列及勾缝。施工脚手架有适用于 6m 以下墩台的固定式轻型脚手架(图 5-2-6)适用于 25m 以下墩台的简易活动脚手架(图 5-2-7);较高的墩台可用悬吊脚手架。

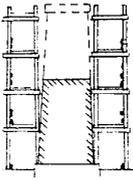


图 5-2-6 轻型固定脚手架

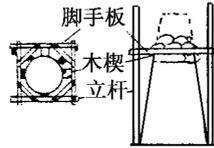


图 5-2-7 活动脚手架

石砌墩台施工应注意如下事项：①墩台砌筑前应将基础顶面洗刷干净；②墩台表层常用块石砌筑，内部由片石填腹；③同一层砌筑顺序是：桥墩先砌上下游圆头石或分水尖，桥台先砌四转角，然后挂线砌筑中部表层，最后填砌腹部；④挤浆法砌筑时，横向缝和竖缝的砂浆均应布满；⑤石料砌前应洗净湿润，砌筑表面应勾缝砌完后按自然法进行养护；⑥墩台的顶帽（盖梁）一般用混凝土或钢筋混凝土灌注。支承垫石位置、标高和锚栓孔眼的位置都应特别注意，其偏差必须满足施工规范要求。

## （二）混凝土墩台

混凝土墩台的施工与混凝土构件施工方法相似，它对混凝土结构模板的要求也与其他钢筋混凝土构件模板的要求相同。根据施工经验，当墩台高度小于 30m 时采用固定模板施工；当高度大于或等于 30m 时常用滑动模板施工。墩台的混凝土具有自身的特点，施工时应特别注意，其特点为：

（1）墩台混凝土特别是实体墩台均为大体积混凝土，为了避免水化热过高而导致混凝土因内外温差过大引起裂缝，水泥应优先选用矿山渣水泥、火山灰水泥，采用普通水泥时标号不宜过高。

（2）灌注混凝土之前应对模板、支架、钢筋及预埋构件进行详细检查，并作完整的记录。同时对模板浇水润湿、嵌缝，并在贴混凝土面上刷一层肥皂水，以防漏浆和便于拆模，钢模板内表面涂上润滑油，使拆模方便。混凝土浇筑过程中也应经常检查模板形状、尺寸，如有问题应及时修理。

（3）当墩台截面小于或等于  $100\text{m}^2$  时应连续浇筑混凝土，以保证混凝土的完整性；当墩台截面大于  $100\text{m}^2$  时，允许适当分段浇筑，其分段原则如下：①段与段的竖向接缝方向，应与墩台宽度即与截面尺寸较短的方向平行；②为加强段与段之间的相互连接，上下相邻层中的竖直接缝应相互错开，并在水平横缝上和竖直接缝上均用片石或钢筋做成适当的接茬；③墩台横截面分段的数目应尽量减少，横截面于小于  $200\text{m}^2$  时宜分为二段， $300\text{m}^2$  以内者不宜超过三段，在任何情况下每段截面积不得小于  $50\text{m}^2$ ；④每段高度应为  $1.5\text{m} \sim 2.0\text{m}$ 。

（4）为了节省水泥，墩台大体积圬工中可采用片石混凝土。其填放石块的数量，不应超过混凝土体积的 25%；石块的最大尺寸，不应超过填放石块处最小结构尺寸的  $1/4$ ；石块的最小尺寸，不宜小于 15cm。石块应选用无裂缝、无夹层和未锻烧过的石块，其抗压

强度不得低于  $3000\text{kN/m}^2$  ,且应具有混凝土内外粗骨料要求的耐久性。石块填放前应用水洗刷干净 ,不得有泥浆和其他污物。石块应均匀分布 ,安放稳妥 ,两石块的间距应允许内部式插入振捣器进行捣实操作 ,一般应大于混凝土中粗骨料的最大粒径 ,并不小于  $10\text{cm}$ 。石块与模板的间距应不少于  $25\text{cm}$  ,且不得与钢筋接触 ,在最上层石块的顶面应覆盖有不小于  $25\text{cm}$  的混凝土层。为了加强混凝土灌筑层间的结合或灌筑工作中断时 ,在前层接缝面上应埋入接茬石块 ,应使其体积露出混凝土外一半左右。

## 二、装配式墩台施工

装配式墩台适用于山谷架桥、跨越平缓无漂流物的河沟、河滩等的桥梁 ,特别是在工地干扰多、施工场地狭窄、缺水与砂石供应困难地区 ,其效果更为显著。装配式墩台的有砌块式、柱式和管节式或环圈式墩台等。

### (一) 砌块式墩台施工

砌块式墩台的施工大体上与石砌墩台相同 ,只是预制砌块的形式因墩台形状不同而有很多变化。例如 1975 年建成的兰溪大桥 ,主桥墩身系采用预制的素混凝土壳块分层砌筑而成。壳块按平面形状分为 II 型和工型两大类 ,再按其砌筑位置和具体尺寸又分为 5 种型号 ,每种块件等高 ,均为  $35\text{cm}$  ,块件单元重量为  $90.0\text{kg} \sim 120.0\text{kg}$  ,每砌三层为一段落。该桥采用预制砌块建造桥墩 ,不仅节约混凝土数量约  $26\%$  ,节省木材  $50\text{m}^3$  和大量铁件 ,而且砌缝整齐 ,外貌美观 ,更主要的是加快了施工速度 ,避免了洪水对施工的威胁。图 5-2-8 为预制块件与空腹墩施工示意图。

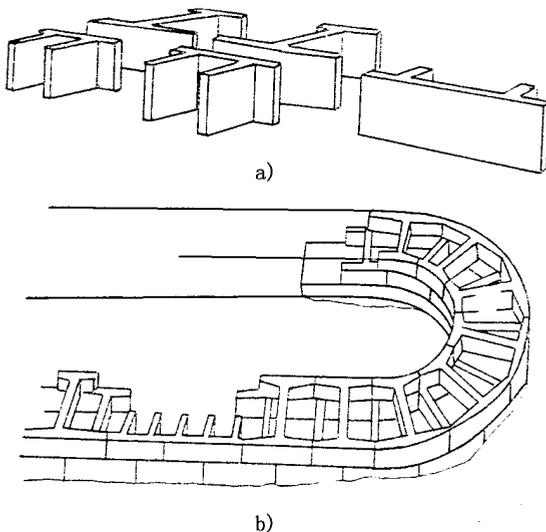


图 5-2-8 兰溪大桥预制砌块体墩身施工示意图

a) 空腹墩砌块 b) 空腹墩砌筑过程

## (二) 柱式墩施工

装配式柱式墩系将桥墩分解成若干轻型部件,在工厂工地集中预制,再运送到现场装配,其形式有双柱式、排架式、板凳式和钢架式等。图 5-2-9 为柱式墩构造示意。施工工序为预制构件、安装连接与混凝土填缝养护等。其中拼装接头是关键工序,既要牢固、安全,又要结构简单便于施工。常用的拼装接头有:

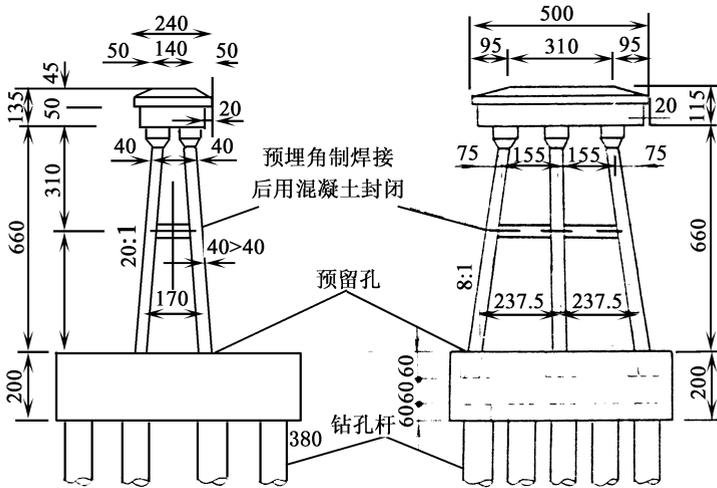


图 5-2-9 排架式拼装墩尺寸单位:cm

(1) 承插式接头:将预制构件插入相应的预留孔内,插入长度一般为 1.2~1.5 倍的构件宽度,底部铺设 2cm 砂浆,四周以半干硬性混凝土填充,常用于柱与基础的接头连接。

(2) 钢筋锚固接头:构件上预留钢筋或型钢,插入另一构件的预留槽内,或将钢筋相互焊接,再灌注半干硬性混凝土。多用立柱与顶帽处的连接。

(3) 焊接接头:将预埋在构件中的铁件与另一构件的预埋铁件用电焊连接,外部再用混凝土封闭。这种接头易于调整误差,多用于水平连接杆与主柱的连接。

(4) 扣环式接头:相互连接的构件按预定位置预埋环式钢筋,安装时柱脚先座落在承台的柱芯上,上下环式钢筋互相错接,扣环间插入 U 形短钢筋焊牢,四周再绑扎钢筋一圈,立模浇柱外围接头混凝土,要求上下扣环预埋位置正确,施工较为复杂。

(5) 法兰盘接头:在相连接构件两端安装法兰盘,连接时用法兰盘连接,要求法兰盘预埋位置必须与构件垂直,接头处可不用混凝土封闭。

装配式柱式墩台施工应注意以下几点:

(1) 墩台柱构件与基础顶面预留杯形基座位编号,并检查各个墩、台高度和基座标高

是否符合设计要求,基杯口四周与柱边的空隙不得小于 2cm。

(2)墩台柱吊入基杯内就位时,应在纵横方向测量,使柱身竖直度或倾斜度以及平面位置均符合设计要求,对重大、细长的墩柱、需用风缆或撑木固定,方可摘除吊钩。

(3)在墩台柱顶安装盖梁前,应先检查盖梁口预留槽眼位置是否符合设计要求,否则应先修凿。

(4)柱身与盖梁(顶帽)安装完毕并检查符合要求后,可在基杯空隙与盖梁槽眼处灌注稀砂浆,待其硬化后,撤除楔子、支撑或风缆,再在楔子孔中灌填砂浆。

## 第四节 桥面及其附属工程施工

### 一、伸缩装置及其安装

表 5-2-10 伸缩装置类型及其安装要求

项 目	伸 缩 装 置 的 类 型 及 其 安 装 要 求
常用伸缩装置的类型	<p>常用伸缩装置有:平板型伸缩装置、梳板型钢板伸缩装置、板式橡胶伸缩装置、M 型或 W 型橡胶伸缩装置等各种型式。为满足特大桥梁的伸缩要求,可采用综合型伸缩装置。</p> <p>桥梁伸缩装置的选用,应根据设计要求,并能符合有关规范所规定的材料性能</p>
伸缩缝的基本要求	<p>伸缩缝的位置、构造应按设计办理,所采用的伸缩装置应能保证上部结构自由伸缩并能承受车辆荷载作用,经久耐用,具有良好的平整度、防水、防尘、便于养护更换</p>
安装伸缩装置应注意事项	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 安装伸缩装置的二孔梁之间的伸缩缝宽度应符合设计要求,倘各梁端面不齐并超过允许偏差时,须采用调整梁位等措施,使缝宽符合设计要求;</li> <li>2. 安装伸缩装置的梁面标高应符合设计要求,当各梁标高相差较大时,必须采取措施调整梁面标高,使误差在容许范围内;</li> <li>3. 伸缩缝内的一切杂物必须清除干净,保证梁体在温度变化时能自由伸缩。安装伸缩装置时,应同时先将梁面扫净,使伸缩装置与梁面得以有效结合;</li> <li>4. 当设计在伸缩缝内安装木屑板或其他弹性材料时,所用木屑板的厚度应与伸缩缝宽相等,其长度亦应根据伸缩缝长度备料,不应采用零碎、不规则的木屑板在现场临时杂凑拼用</li> </ol>

项 目	伸 缩 装 置 的 类 型 及 其 安 装 要 求	
梳板型钢板 伸缩装置的 安 装	1. 清扫伸缝中的杂物,以保证梁体结构随温度变化能自由伸缩; 2. 预埋槽钢或角钢的锚筋应与梁体的预留钢筋焊接牢固,预埋槽钢或角钢的顶面高程应符合桥的纵横坡度,不应有局部变形,以保证预埋件质量; 3. 两齿板宜由同一块钢板用仿形切割而成,安装时配对就位,锯齿的表面要有一定的光洁度,防止误差造成齿、槽相顶; 4. 梳形钢板伸缩装置安装时的间隙,应按安装时的梁体温度决定,一般可按下式计算:	
	计 算 公 式	说 明
	安装时的梳形板间隙 $\Delta l$ $\Delta l = l - l_1 + l_2$	$l$ ——梁的总伸缩量; $l_1$ ——施工时梁的伸长量,应考虑混凝土干燥收缩引起的收缩量;预应力混凝土梁还应考虑混凝土徐变引起的收缩量; $l_2$ ——富余量
	注 接缝四周的混凝土宜在接缝伸缩开放状态下浇筑	
平板型钢板伸 缩装置的安装	5. 为减少现场焊接的变形,可在厂内加工制作成一定长度的单元段,在施工现场进行安装焊接  1. 镀锌铁皮的弯制形状及其与预埋角钢的连接应符合设计要求; 2. 锚筋与预埋角钢的焊缝长度应符合设计要求,并应采用跳焊等工艺,使角钢电焊后不产生影响使用的变形; 3. 角钢安装应注意其顶面标高、平正度、线形及路拱等符合要求,并使之定位牢固,在浇筑混凝土时不会产生移位现象; 4. 浇筑混凝土必须振捣密实,捣插时应使振动棒不直接敲击预埋角钢,防止产生位移; 5. 清除预埋角钢上的水泥浆,修补脱漆部位,电焊钢盖板,点焊间距应不大于 50cm	
	采用橡胶伸缩装置时,橡胶材料的性能应符合有关规定。根据桥梁跨径的大小或连续梁(包括桥面连续的简支梁)的每联长度,可分别选用板型、空心板型、M 型、管形或 $\Omega$ 型伸缩装置。安装时,应根据气温高低,对橡胶伸缩体进行必要的预压缩(亦即根据安装时的实际气温计算出预压缩量,采用特制工具在安装时将橡胶板予以压缩)。 按 JTJ041-89 规范规定:当气温在 5℃ 以下时,不得进行橡胶伸缩装置施工。上海市政工程要求橡胶伸缩装置不得在 0℃ 以下的气温进行安装施工。 橡胶伸缩体可采用螺栓固定、胶接或嵌入伸缩缝结构	
后嵌式橡胶伸 缩体的安装	采用后嵌式时应在桥面混凝土干燥收缩完成且徐变也大部分完成后再进行安装。伸缩体块所需数量,应根据总伸缩量决定。每一橡胶伸缩体块嵌入槽体时,应按温度高低施加预压力	
平板型橡 胶伸缩装 置的选定	1. 板式橡胶装置的伸缩量可自 30mm 至 150mm,为目前常用的桥梁伸缩装置,应按设计图纸的规定选用相应的型号; 2. 橡胶伸缩装置所采用的原料一般有氯丁胶(常温型)和三元乙丁胶(耐寒型)两种,可按设计规定或所在地区的气温决定; 3. 所有附件(包括螺栓、螺母、弹簧垫圈、盖帽等)均应配套供应	

项 目	伸 缩 装 置 的 类 型 及 其 安 装 要 求
板式橡胶伸缩装置的安装	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 必须确保锚固螺栓的锚固强度和橡胶底部混凝土、过渡段混凝土的强度以及橡胶板面的平整度,为此,要求必须按制订的施工方案、顺序组织施工,确保安装质量;</li> <li>2. 安装伸缩缝前,须清理缝中杂物,以保证梁体结构随温度变化自由伸缩;</li> <li>3. 预制梁安装时必须注意,要求梁面平整、梁端顺直,伸缩缝的宽度基本一致,误差应在容许偏差范围内;</li> <li>4. 在伸缩装置两边 30cm 宽的水泥混凝土过渡段中,按设计要求布置钢筋网,并按设计要求安置预埋螺栓,要求螺栓安置牢固,位置正确,垂直;</li> <li>5. 过渡段的混凝土浇筑强度宜为 40MPa,必须振捣密实,表面平整,立模浇筑混凝土前应对预埋螺栓加以防护,以免损坏螺纹;</li> <li>6. 安装橡胶板时,必须注意平整、密贴。旋紧螺栓,在螺孔内灌注密封胶,螺栓外涂防腐脂,每段橡胶板拼装时,在企口形连接处涂刷密封胶,要求接缝平整严密不漏水;</li> <li>7. 橡胶板安装全部完成后,方可安装盖帽,完成安装工作;</li> <li>8. 橡胶板安装时,宜略高于过渡段混凝土面</li> </ol>

注:桥梁用橡胶伸缩缝材料性能、参数、规格可参见《实用土木工程手册(第二版)》(第 716~721 页),人民交通出版社,1994 年。

## 二、梁间接缝施工

表 5-2-11 预制梁安装接缝施工要求

项 目	预 制 梁 安 装 接 缝 施 工 要 求
接缝要求	<p>预制安装的板梁、T 形梁及箱形梁在梁位和标高安装最后固定后,可进行梁与梁之间的接缝工作,梁间接缝,必须符合设计图纸及有关要求,T 形梁和箱形梁的梁面应在安装前进行凿毛处理</p>
板梁的接缝	<p>板梁接缝的宽度一般为 10mm,在接缝处安装底模板(因梁间接缝较窄,一般可在缝内吊挂铁丝间段固定底模即可)。充分浇水湿润后进行灌缝工作,缝间可灌水泥砂浆,上灌细石混凝土,并以钢钎捣插密实</p>
T 形梁及箱形梁的现浇横隔梁操作平台支架	<p>对现浇横隔梁的操作平台可利用梁间缝隙搭架悬吊支架,以利操作。 支架的搭设必须稳定、牢固,同时须注意在跨河或跨路处,应满足通航或通行的净空要求。在电焊影响范围内,应采取防火及防止焊渣、火花下溅的防护措施</p>
接缝钢筋接头的处置	<p>接缝钢筋的接头应按设计要求进行焊接或绑扎,当相接的横隔梁错位较大时,应采取措施调正相接钢筋的位置,不得用重锤、敲击的办法强行调整钢筋位置,以免损伤横隔梁</p>
拆模与修整	<p>接缝砂浆、细石混凝土硬化后,所有底模均应拆除,如发现接缝不密实时,应用同标号砂浆填嵌修补(松散或接缝不实处应先凿去后填嵌)。 对于板梁的接缝应用水泥砂浆进行勾缝,并保持线条顺直,外观整洁</p>

注:有关桥面伸缩缝的养护维修。

## 三、桥面水泥混凝土铺装

表 5-2-12 水泥混凝土面层铺装

项 目	水泥混凝土面层铺装方法和要求
浇筑铺装混凝土的准备工作	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 浇筑面层铺装混凝土时,必须在横向联结钢板焊接工作完成后方可进行,以免后焊的钢板涨缩引起桥面混凝土在接缝处发生裂纹;</li> <li>2. 浇筑混凝土前使预制桥面板表面粗糙,清洗干净,按设计要求铺设纵向接缝钢筋网或桥面钢筋网,然后浇筑;</li> <li>3. 桥面铺装混凝土如设计为防水混凝土,施工时应按防水要求施工,防水层不得漏水或使水渗入结构本体。</li> <li>4. 浇筑铺装层之前应复测梁板面标高,如系预应力混凝土梁,则每跨至少复测跨中和支点处的中线和边线标高,如果铺装层的最小厚度不能满足设计要求时,就需调整设计标高,应事先取得有关方面的同意和签证</li> </ol>
桥面钢筋绑扎	<p>桥面钢筋的绑扎应根据设计要求和有关规定,一般可参照有关绑扎搭接要求,必须注意放正钢筋位置,对斜交桥梁,桥面钢筋应按图纸规定方向置放,防止有误,所有钢筋均应正确留有保护层厚度;对采用双层钢筋网时,两层钢筋之间应有足够数量的定位撑筋,以保证两层钢筋的位置正确</p>
面层混凝土的分仓浇筑	<p>铺筑桥面混凝土时,为防止铺装层出现收缩裂缝,宜采用分仓浇筑施工法,分仓原则可按桥面宽度以及无伸缩缝桥面的长度来考虑,并在施工组织设计中有计划地事先作好周密布署,重大工程尤其不可忽视</p>
浇筑水泥混凝土铺装层的注意事项	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 浇筑铺装层时,必须严格要求,不得在钢筋上搁置重物或运料小车在钢筋网上推运及人行践踏而使钢筋移位,必须搭设走道支架架空,并在浇筑过程中,随时注意纠正钢筋位置;</li> <li>2. 浇筑混凝土时,宜从下坡向上坡进行,要求路拱符合设计规定,面层必须平整、粗糙;由于桥面纵坡较大,因此必须进行压纹处理;</li> <li>3. 当在水泥混凝土面层上,再需铺装沥青混凝土时,则水泥混凝土面层上,必须采用特制工具在水泥混凝土初凝前加以重点扫毛,并要求其表面呈现深度为 2~3mm 的均匀凹槽,用以增加与沥青混凝土面层的粘结。 沥青混凝土面层宜采用粗糙度较大的防滑层结构。</li> <li>4. 连续桥面的施工应符合有关设计规定的要求</li> </ol>

## 四、桥面沥青混凝土铺装

表 5-2-13 沥青混凝土面层铺装

项 目	沥青混凝土面层铺装方法和要求
铺筑沥青混凝土的准备工作	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 铺筑沥青混凝土面层以前,须对水泥混凝土面层的平整度、粗糙度等进行检查,应符合规定的设计要求。并测设中线和边线的标高,根据所需铺筑沥青混凝土的最小、最大及平均厚度计算沥青混凝土的数量,做好用料计划。</li> <li>2. 清扫水泥混凝土面层,保持清洁、干燥,并喷洒粘层油,粘层沥青宜采用快裂的洒布型乳化沥青,也可采用快、中凝液体石油沥青或煤沥青,并采用机械喷布工艺,用量一般控制在 0.3~0.4kg/m<sup>2</sup>,要求洒布均匀</li> </ol>

项 目	沥 青 混 凝 土 面 层 铺 装 方 法 和 要 求
浇洒粘层沥青工艺要求	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 如上所述 粘层沥青应均匀洒布(亦可涂刷)。浇洒过量的局部地段或积聚油量较多时应予以刮除;</li> <li>2. 当气温低于 10℃或水泥混凝土面层潮湿(或不洁)不得浇洒粘层沥青;</li> <li>3. 浇洒粘层沥青后,严禁除沥青混合料运输车外的其他车辆、行人通过;</li> <li>4. 粘层沥青洒布后,应紧接铺筑沥青混凝土面层,但乳化沥青应待破乳、水分蒸发完后铺筑;</li> <li>5. 洒布沥青粘层前宜在路缘石上方涂刷石灰水或粘贴保护纸张,以免沥青沾染缘石</li> </ol>
铺筑沥青面层时伸缩缝处理	<p>伸缩缝处宜用黄砂等松散材料临时铺垫与水泥混凝土顶面相平,沥青混凝土面层可连续铺筑。铺筑完成后再按所用伸缩装置的宽度,划线切割,挖除伸缩缝部分的沥青混凝土后再安装伸缩装置</p>
热拌沥青混合料的运输	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 沥青混凝土面层铺筑用沥青混合料应采用较大吨位的自卸汽车运输,车厢应清扫干净。为防止沥青与车厢板粘结,车厢侧板和底板可涂一薄层油水混合液(柴油与水比例可为 1:3)但不得有余液积聚在车厢底部。</li> <li>2. 运料车应用篷布覆盖,用以保温、防雨、防污染,夏季运输时间短于 0.5h 时,亦可不加覆盖。</li> <li>3. 连续摊铺过程中,运料车应在摊铺机前 10~30cm 处停住,不得撞击摊铺机,卸料过程中运料车应挂空档,靠摊铺机推动前进。</li> <li>4. 沥青混合料运至摊铺地点后应凭运料单接收并检查拌和质量及温度要求,遇有已经结成团块、或已经遭雨淋湿的混合料不得铺筑在桥面、道路上</li> </ol>
沥青混凝土面层的铺筑	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 铺筑沥青混凝土面层应采用机械摊铺,并宜以伸缩缝的间距确定一次铺筑的长度,要求在相邻两个伸缩缝之间尺量不设置施工缝。桥面的宽度宜在 1d 内铺筑成,每次铺筑的纵向接缝宜在上次铺筑的沥青混凝土的实际温度未降至 100℃时予以接缝铺筑并碾压。</li> <li>2. 根据水泥混凝土面层的平整度、沥青混凝土面层的厚度和结构层次决定一次铺筑或两次铺筑。沥青混凝土面层厚度大于 6cm 时,宜采用两次铺筑以提高沥青混凝土面层的平整度。</li> <li>3. 沥青混合料必须缓慢、均匀、连续不间断地摊铺。摊铺过程中不得随意变换速度或中途停顿。摊铺速度一般应控制在 2~6m/min,可根据沥青混合料供应及机械配套情况及摊铺层厚度、宽度确定。</li> <li>4. 摊铺好的沥青混合料应紧接碾压(碾压方法、要求可参照沥青路面施工有关规定),如因故不能及时碾压或遇雨时,应停止摊铺,并对卸下的沥青混合料覆盖保温</li> <li>5. 当先铺筑的沥青混凝土的实际温度降至 80℃以下时,与后铺筑的沥青混凝土应按冷接缝方式处理,即铣刨接缝处的沥青混凝土,要求接缝顺直。纵缝的铣刨宽度宜为 20~30cm,横缝的铣刨宽度应用 3m 直尺测量后决定,一般不宜小于 100cm。如无铣刨机时,可按划线用切缝机切割后,再凿除。</li> <li>6. 沥青混凝土面层的铺筑和碾压宜从下坡向上坡进行。施工车辆和施工机械不准停留在新铺筑的沥青混凝土面层上,也不准柴油之类的油料滴漏在沥青混凝土面层上,以免引起沥青混凝土软化、拥包</li> </ol>

## 五、其他附属工程

表 5-2-14 其他附属工程施工方法和要求

项 目	附属工程施工方法和要求
防水层的铺设	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 防水层材料应经检查,符合规定标准后方可使用;</li> <li>2. 防水层通过伸缩缝或沉降缝时,应按设计规定铺设;</li> <li>3. 防水层应横桥向闭合铺设,底层表面要求平顺、干燥、清洁,沥青防水层不宜在雨天或低温下铺设;</li> <li>4. 水泥混凝土桥面铺装层当采用油毛毡或麻织物与沥青粘合的防水层时,应设置隔断缝</li> </ol>
泄水管与沉降缝的设置	<p>泄水管设置的位置、数量和材料应按设计要求执行。泄水管应伸出结构物底面 10~15cm,并确保桥面铺装后畅通无堵塞。</p> <p>有关沉降缝设置的位置,必须按设计规定,接触面要求平整,一般不必留缝宽,用油毡等隔开即可</p>
安全带及人行道的安装	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 人行道板安装前,必须精确进行放样定位,包括路缘石、安全带、栏杆基座,现浇混凝土的人行道板、梁等,倘遇预埋钢筋位置不准时,应予调整。</li> <li>2. 悬臂式安全带和悬壁式人行道构件必须与主梁横向连结或拱上建筑完成后才可安装。</li> <li>3. 安全带梁及人行道梁必须安放在未凝固的 20 号(MPa)稠水泥砂浆上,并以此来形成人行道顶面设计的横向排水坡。</li> <li>4. 人行道板必须在人行道梁锚固后方可安装(铺设),对设计无锚固的人行道梁,人行道板的铺设应按照由里向外的次序施工。</li> <li>5. 人行道板安装高程控制,应依据桥中线标高换算成路缘石顶面标高,并于每孔梁的两端及跨中放出样桩,标志的高程为准</li> <li>6. 预制人行道板在铺设前要检查验收,凡发现有裂缝或破损时,不应使用。</li> <li>7. 铺设好的人行道板应安放稳固不摇动,外侧边线顺直,相邻板的高差不大于 5mm。</li> <li>8. 在人行道面前,应先按设计要求安装人行道伸缩装置,与抹面粉刷相接的部位要立模,模底部应与人行道板密贴,防止水泥砂浆流入伸缩缝内。</li> <li>9. 人行道板接缝处应用水泥砂浆嵌填,并打扫干净后,按规定绑扎钢筋网,充分湿沾并清除积水后,浇筑细石混凝土,于初凝前完成抹平操作,不应再加水泥浆抹面,以防脱落。</li> <li>10. 人行道面的划线分格,应按设计要求执行,并在混凝土初凝前完成,当人行道考虑美观要求时,可在道面粘贴彩色人行道板,亦根据设计规定进行</li> </ol>

项 目	附属工程施工方法和要求
路缘石、栏杆及防撞护栏的浇筑和设置	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 为减少从缘石与桥面铺装缝中渗水,缘石宜采用现浇混凝土,使其与桥面铺装的底层混凝土结为整体。</li> <li>2. 对于现场浇筑混凝土的路缘石,宜采用光洁度较高的模板,立模必须支撑牢固,线型要顺直,纵坡和顺,标高误差不大于 2mm。</li> <li>3. 防撞护栏、栏杆及灯桩的位置必须精确定位,预埋钢筋的位置有出入时应予调整。</li> <li>4. 防撞护栏与栏杆的伸缩缝应同桥面的伸缩缝在同一直线上。</li> <li>5. 栏杆块件必须在人行道板铺设完毕后方可安装,安装栏杆柱时,必须全桥对直、校平(弯桥、坡桥要求平顺)竖直后用水泥砂浆填缝固定。</li> <li>6. 采用钢管作为栏杆扶手时,钢管应在工厂内调直整形,并根据钢管长度合理选择接头的位置。扶手端部应焊接端盖,防止雨水侵入。</li> <li>7. 用于栏杆的钢管宜在工厂内采用“酸洗”、“喷丸”等工艺进行充分除锈,并在除锈后接着喷涂防锈底漆。</li> <li>8. 钢管扶手安装完毕后,应对电焊及脱落油漆的部位加以清理,补涂防锈底漆后统一涂刷面漆。</li> <li>9. 表面不加任何装饰的栏杆,其预制件与现场浇筑的立柱混凝土宜采用同品种、同标号的水泥,以保持色泽一致。</li> <li>10. 混凝土浇筑完成后,应立即对现场进行清理,将被水泥浆溅落的部位冲刷干净,防止粘结,保持外观整洁</li> </ol>

## 六、附属工程施工质量要求

表 5-2-15 桥面附属工程质量要求和容许偏差

项 目	序 号	工程 质量 要求 及 容 许 偏 差
伸缩缝	1	伸缩缝应上下贯通,缝中应填塞有弹性耐高温的材料,不得有堵塞和变形情况
防水层	2 2-1 2-2	防水层的设置除应按设计有关规定执行外,还应符合下列要求: 防水层(包括与泄水管衔接处、伸缩缝、沉降缝)不得漏水或使水渗入结构本体; 拱脚附近坡面处防水层不许有溜滑、挤损情况
安全带、缘石、人行道、栏杆、灯柱	3 3-1 3-2 3-3 3-4 3-5 3-6 3-7 3-8 3-9	安全带、缘石、人行道、栏杆、灯柱必须牢固、线条直顺、整齐美观;各种缝隙应灌浆饱满、平整; 安全带、缘石、人行道边沿,平面容许偏差(长桥 30m 通线检查) 5mm; 栏杆平面容许偏差(每 5 根柱通线) 4mm; 栏杆柱顶面高差 4mm; 栏杆扶手平面容许偏差 3mm; 相邻栏杆扶手高差 5mm; 安全带、缘石、人行道接头高差 2mm; 灯柱位置; 顺桥方向 100mm; 横桥方向 20mm 灯柱竖直度; 顺桥向、横桥向 20mm

注:本表根据 JTJ041-89 摘编。

## 第三章 各类桥梁施工质量控制

### 第一节 桁式组合拱桥施工

桁式组合拱桥的建造程序为 :从已建成的墩、台上向跨中逐件(或逐段)安装桁片预制构件 ,并同时安装横向联系 ,安装部分上、下弦顶、底板 ,至跨中合拢。然后 ,进行体系转换 ,并与安装剩余的上、下弦顶、底板交叉进行 ,最后安装牛腿、人行道板、栏杆、浇筑桥面混凝土。

采用桁架伸臂法架设桁式组合拱桥 ,悬拼工艺流程中最主要的是 :按照设计的悬拼加载程序 ,将构件安全、准确的吊装就位——张拉预应力钢筋(丝)使构件稳定——主孔悬挂重量通过上弦和斜杆分别传边孔各基础 ,借助于可靠的锚固 ,使基础和地基牢固连接在一起 ,共同抵抗主孔悬拼产生的倾覆力矩。概括起来 ,悬拼工艺成功的三要素是 :吊得起、拉得住、锚得稳。当然 ,围绕这三个因素 ,有一系列的工艺 ,如 :构件的预制—脱模—移运—翻身—吊装—横浪就位—临时稳定—构件接头处理—张拉预应力钢筋(丝)—移运吊机—连续悬拼—合拢—体系转换等 ,其中的每一步骤 ,都必须有相应的技术措施予以保证。

#### 一、下部构造及边孔施工

##### (一)墩台及基础施工

桁式组合拱桥无论是悬拼施工阶段或是营运阶段 ,都有一定的拉力由主孔上弦、斜杆传至边孔墩台 ,半跨最大悬挂阶段拉力最大 ,为控制墩、台设计的主要因素。

根据边孔桥型的不同,桥台有自锚式和锚固式两种形式。

自锚式桥台一般为箱形截面,底部为钢筋混凝土弧形铰。这种弧形铰的施工属常规施工,不再详述。

锚固式桥台基础将承受上拔力和剪力。上拔力通常采用设置一定数量的锚桩加以克服。剪力则依靠前方天然岩体的抗剪强度加以克服,因此,要求基础有一定的嵌岩深度。对这类墩、台基础施工,有以下特殊的要求:

### 1. 基坑开挖

锚固式桥台与地基必须紧密连接在一起,基坑开挖时须保证基坑四壁不受爆破岩石的影响,因此,必须遵循一定的开挖顺序和方法(图 5-3-1)。

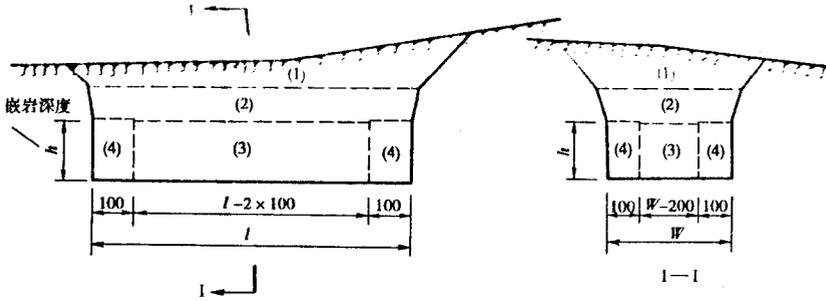


图 5-3-1 嵌岩基坑开挖(单位:cm)

1—清除覆盖层 2—清除风化层 3—开炸基坑中部岩石 4—用光面爆破拓宽

首先,是嵌岩线以上部分的开挖,可按一般明挖基础的要求进行操作。开挖至设计嵌岩线时,将坑面整平划线,四边各留出 80~100cm 的宽度。接着开挖基坑中心部分(由中心向四周扩散)至设计基底高程。然后用光面爆破法将四周所留岩石炸去,嵌岩基坑的四壁尽可能取直,以减少回填混凝土用量。最后用人工凿平四壁及基底,清除裂隙中的填充物。

因为主孔悬拼产生的拉力转化为墩、台的剪力,并靠墩、台前方的天然岩体抗剪强度来克服,所以基坑开挖时应特别注意不要破坏墩、台前方岩体的整体性。基坑开挖至嵌岩线时,应尽量少用爆破,宜用冷开。

### 2. 锚桩施工

锚桩按常规钻孔灌注桩方法施工。锚固钢筋采用单根 25mm 或 32mm 高强钢筋,钻孔直径不小于 3 倍钢筋直径,桩与桩之间的净距离也不应小于 3 倍桩径。锚固桩的数量、钻孔深度(即钢筋锚固深度)应通过计算确定。如上拔力特别大,可采用多根钢筋组成钢筋笼。

为增大钢筋与混凝土之间的粘结力,可在钢筋上、下端各戴 1 个套筒(或螺帽),上端

螺帽可与基础中的普通钢筋电焊连接。

钻孔完毕应进行清理,清除孔内杂物和水,然后下钢筋或钢筋笼,最后浇灌 1:1 的水泥砂浆或小石子混凝土。

影响锚桩深度的主要因素是混凝土与岩石的粘结力,如无参考资料,应在桥址现场进行拔桩试验,以获取可靠数据。

### 3. 基础浇筑

桁式组合拱桥的基础与地基均采用固结,所以,浇筑基础时,对嵌岩线以下的超挖部分,采用同标号混凝土原槽灌满。

## (二) 边孔施工

边孔无论采用哪种桥型,都可以根据地形和施工设备情况,采用支架现浇或吊装。

### 1. 边孔为桁拱时

边孔采用桁拱时,如采用吊装,会碰到构件分段、吊装中的临时稳定等困难,故一般采用支架施工。如桥下净空较高,搭设支架有困难,也可采用预制吊装,桁架节间及预制构件分段应根据吊装需要和吊机起重能力划分,有时需增加 1 根竖杆,以便组成桁架单片。施工中还必须考虑构件临时稳定措施。湾潭大桥(边跨 27m)就是根据这一原则处理的。下面介绍该桥边孔的施工程序(图 5-3-2)。

(1) 吊装边孔二段桁片,前端支承于临时支架上,后端与桥台连接,在桁片与桥台之间设 30cm 现浇段,将钢筋全部电焊连通后浇接头混凝土(图 5-3-2)。

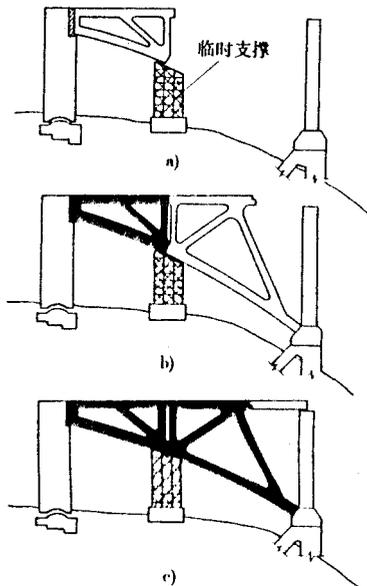


图 5-3-2 湾潭大桥边孔吊装图

临时支架构造较简单,下部为混凝土基座,上部为扣件式钢管支架。

因边孔二段斜杆下端与边孔脚段反向斜杆下端均与下弦相交,且距离很近,根据构造需要,边孔二段斜杆的预应力钢筋,在吊装前张拉,并灌浆、封锚。

(2)吊装边孔脚段桁片,前端(下弦)支承于拱座上,后端支承于临时支架上,然后现浇与边孔二段上、下弦连接的接头(图 5-3-2)。

(3)吊装边孔脚段上弦(图 5-3-2)。

(4)安装边孔下弦底板、顶板。

(5)安装边孔上弦底板、顶板(桥面板)。

(6)张拉边孔脚段斜杆预应力钢筋。

整个边孔吊装过程,人字桅杆吊机都是安置在桥台顶部的,为防止吊机脚的水平分力引起桥台顶部水平位移,在吊装前将桥台与路基挡墙之间的简支板安装完毕,并将桥台底部弧形铰临时加以支垫,使其不产生转动。

## 2. 边孔为钢构时

边孔采用钢构或连续钢构时,多数都采用支架施工。如高度较大,也可以采用吊装施工。一般是先现浇筑桥墩,再吊装上弦桁片,形成钢构,再安装上弦顶底板。如边孔跨度较大,安装上弦顶底板之前必须先张拉预应力钢筋。第一孔形成后,移动吊机至 1 号桥墩顶部,按上述操作再吊装第 2 孔、第 3 孔,直至边孔完成。

有的桥在边孔吊装时,将墩上立柱顶部节点块与最后一个上弦构件一道预制吊装。这主要是因为墩上立柱节点块构造复杂,就地现浇难度较大,特别是各点空间坐标的放样、预应力孔道的交叉、放样等都比较困难。如果放在预制场上进行上述操作,就比较容易了(图 5-3-3)。

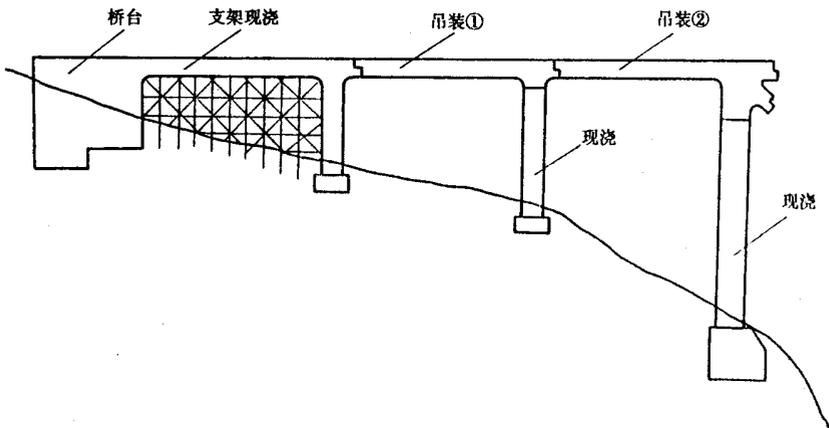


图 5-3-3 吊装上弦与墩上立柱顶部节点块

## 3. 边孔为桁式钢构时

江界河大桥边孔采用桁式钢构,根据地形条件,边孔高度较矮的就采用支架现浇,边孔高度较高的采用吊装。为了吊装就位需要,必须采用竖杆(桥墩)—斜杆—上弦的吊装顺序,这就存在三根杆件相交的节点块划到哪一个杆件上的问题。如划到竖杆上,则因节点块重心对竖杆的悬臂较大,重量较重,吊装就位时重心不好掌握,也不便于稳定;如划到斜杆上,则因节点块和斜杆在重量和截面刚度上相差较大,卧式预制后翻身困难(斜杆和节点块在一起不能采用立式预制);如划到上弦上,则竖杆和斜杆吊装后互相不能连接,也无法稳定。所以,节点块划到哪一个构件上都不恰当,只得单独作为一个构件进行预制吊装。

该桥瓮安岸边孔施工顺序如下(图 5-3-4):

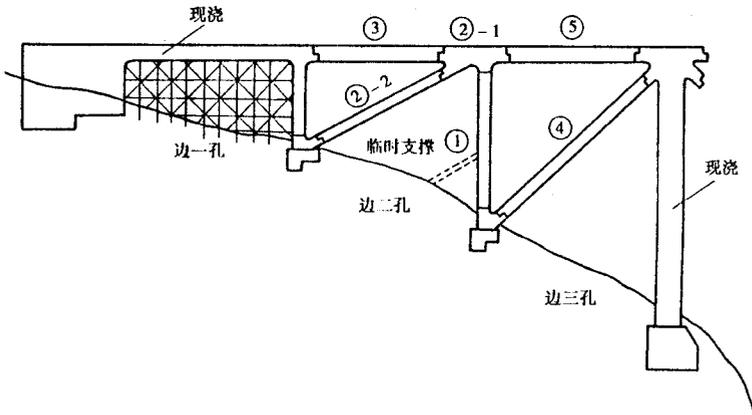


图 5-3-4 江界河大桥边孔施工顺序

- (1) 支架现浇边一孔;
- (2) 安装吊机于边一孔竖杆(桥墩)顶部;
- (3) 吊装边 1 号竖杆,采用临时支撑稳定;
- (4) 吊装边 2-1 号节点块,就位后,放吊机后组起重索,用前组起重索稳定;
- (5) 用吊机后组起重索吊装边 2-2 号斜杆,并张拉斜杆预应力钢索,形成三角形稳定体系后松索;
- (6) 吊装边 3 号上弦,张拉上弦预应力钢筋后松索;
- (7) 安装上弦顶、底板,至此,边二孔形成;
- (8) 移动吊机至边二孔竖杆(桥墩)顶部;
- (9) 吊装边 4 号斜杆,并张拉斜杆预应力钢索,形成三角形稳定体系后松索;
- (10) 吊装边 5 号上弦,并张拉上弦预应力钢筋;
- (11) 安装上弦顶底板,至此,边孔全部完成。

在以上操作中,都是先后安装上游桁片、下游桁片,紧接着安装横向联系。

## 二、构件预制及移运

### (一) 预制构件分段

桁片预制构件分段主要考虑预制场地布置、吊机的起重能力、吊机的有效伸臂距离以及悬拼顺序。

跨径 100m 以下的桁式组合拱桥,如采用带竖杆的三角形形式桁构,一般可按节间划分,每个节间作为一个预制单元(图 5-3-5)。当采用人字桅杆吊装时,预制构件的几何尺寸还需考虑从桅杆脚下穿过的可能性。脚段预制构件外轮廓尺寸较大,构件移运穿过吊机有一定困难,一般在桥下预制场上预制,垂直起吊。如桥下无法设置预制场,也可改用斜拉杆式桁构,并采用单杆预制吊装。

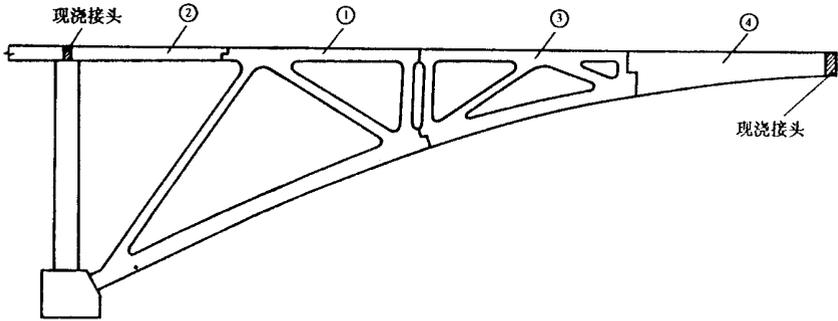


图 5-3-5  $L \leq 100\text{m}$  预制构件分段

按节间划分预制单元的,在预制构件分段时,必须将脚段分成两件:从桥墩至第一个节点之间的上弦单独划分出来,作为一个独立构件预制;余下的上弦、腹杆、下弦作为一个梯形单片预制。悬拼时,首先将梯形单片吊运就位,并用吊机的前组起重索加以稳定,腾出后组起重索吊装上弦单件。采用这种分段方法,脚段梯形单片必须采用卧式预制,因预制构件外轮廓几何尺寸较大,移运困难,必须在桥下预制场上预制,垂直起吊。因第一根斜杆较长,刚度较小,翻身有一定难度,因此,在翻身前常对这根长斜杆施加临时体外预应力,以确保翻身和吊装时构件的安全。

跨径 100~200m 的桁式组合拱桥,可采用单杆、梯形单片、三角形单片等多种形式预制(图 5-3-6),预制构件质量一般可控制在 60t 以内。在有条件的地方,可在桥下预制,垂直起吊。也可在引道或主、边孔已成桥面上预制,凡是在吊机后方预制的,均需考虑构件移运穿过吊机的可能性。

施工实践表明,采用梯形、三角形单片方式分段预制(如图 5-3-6 中的⑨号、⑪号构件),可减少吊装次数,缩短吊装时间,也可减少预制构件接头,增强构件的整体性,但

由于预制构件庞大 移运翻身都有一定的难度 而且只限于在吊机前方预制、垂直起吊。采用单件预制吊装,虽增加了吊装次数和接头数量,但因构件相对较轻,吊装安全、稳妥,吊装速度也可以提高,只要认真处理接头,构件的整体性仍然是可以得到保证的。所以,无论跨径大小,都宜采用单件预制吊装(图 5-3-6)。

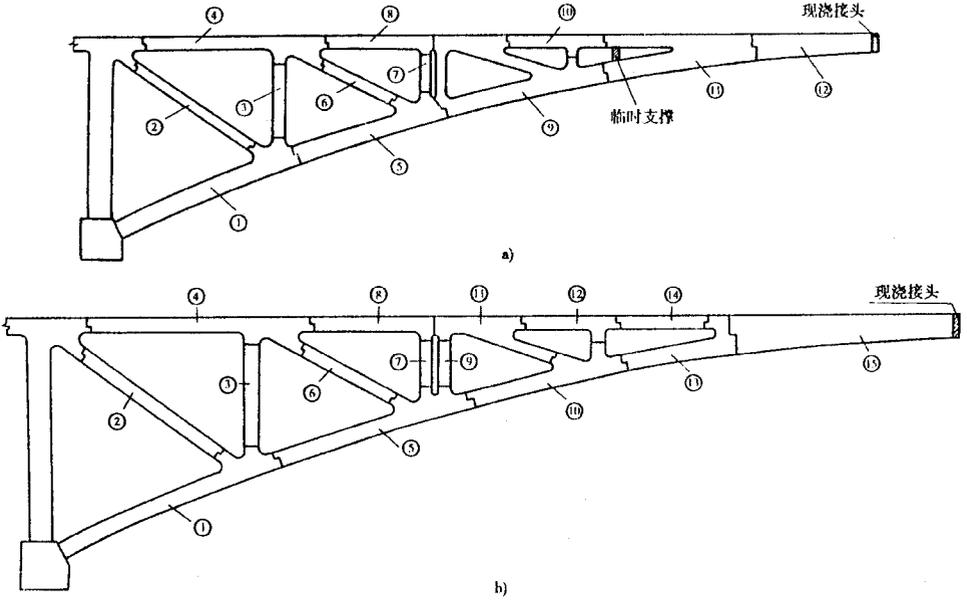


图 5-3-6  $100\text{m} < L \leq 200\text{m}$  预制构件分段

跨径 200m 以上的桁式组合拱桥,由于杆件截面尺寸较大,均采用单杆预制吊装。如跨径特大,一个节间的上、下弦还必须分成两个预制单元,以满足吊机的起重能力。江界河大桥主孔半跨预制构件分成七段,全桥共十四段,108 个预制构件(图 5-3-7)。

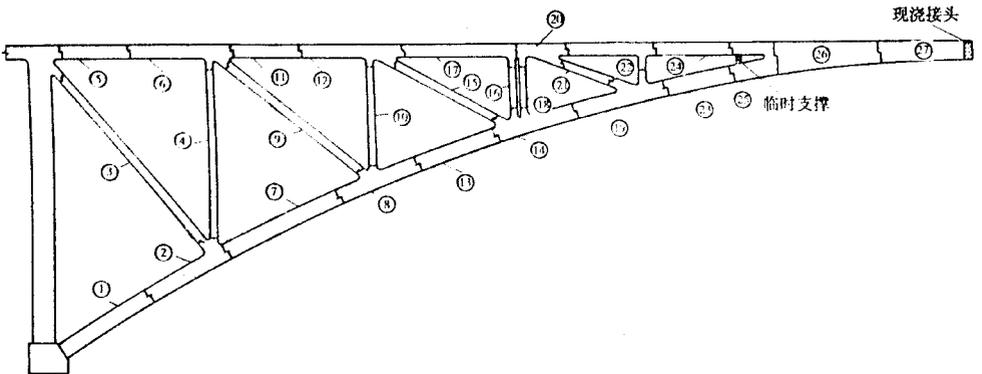


图 5-3-7 江界河大桥预制构件分段

### (二) 构件预制

#### 1. 预制方式

桁片构件的预制,分为卧式和立式两种。卧式预制便于放样,底模较简单,但多一道构件翻身的工序。立式预制省去了构件翻身这一步,但放样较困难,带弧形的下弦构件采用立式预制时,底模制作难度较大。

构件翻身有一定的难度,特别是长大构件的翻身,稍不注意,就可能使构件扭曲以致损伤,因此,除有节点的上弦构件,因带有向下的腹杆短肢而不宜采用立式预制外,其余构件应尽量采用立式预制,以避免构件翻身,加快吊装进度。

带节点的下弦构件,因带有向上的腹杆短肢,放样时必须同时以平面位置和高程控制,以空间坐标放样。须特别注意腹杆与下弦构件的交角,保证精度,否则会造成构件就位的困难。

对卧式预制的构件,须特别注意预应力孔道的成型。因为上弦和斜杆的预应力筋多布置在上、下缘,当采用卧式预制时,预应力孔道正好处于预制方向的两侧壁上,如侧壁较薄,事先将抽拔的钢管一次安装到位,则浇筑混凝土时不仅影响进料,就是振捣棒也难以伸下去,所以,只能采取边浇筑,边穿钢管的方法。为了保证孔道位置准确,可事先将钢管预装好,安好定位筋,然后将底排以上钢管抽出,随着浇筑程序,再逐根将钢管穿入。为便于振捣,内模可采用活动式的,每隔一定距离就设置一段活动模板,随着浇筑高度的增加,边浇筑,边安装。当然,这些活动模板必须事先按要求拼装好,浇筑时即可对号入座,不能到浇筑时临时拼装。

#### 2. 箱形截面浇筑

100m 以上的桁式组合拱桥,构件均采用箱形截面,无论卧式预制或是立式预制,都会碰到箱形截面的浇筑顺序问题。对高度不大、管道不多、浇筑难度较小的箱形截面,可采用两次成型的方法,即先浇底板和两侧壁,形成开口箱,然后再浇顶板,形成闭合箱。对高度很大、管道较多、钢筋密集的大型预制构件,可采用三次成型的方法,先浇底板,再浇两侧壁,最后浇顶板形成闭合箱。无论两次或三次成型的构件,先后两次浇筑的结合面都必须认真凿毛,按正规的施工缝要求处理。浇筑顶板时必须留出工作孔,以便工作人员进入箱内拆除顶板底模,并清除箱内杂物,最后再将工作孔封闭。

箱内的肋隔板为先期预制,并安装于预制构件的钢筋骨架中,浇筑桁片时与之连成整体。

为保证振捣效果,在节点和钢筋、管道特别密集的部位,可辅以附着式振捣器,但必须加强模板的连接和整体性。

桁式组合拱桥的上、下弦节点,大多数都设置有预应力钢筋的锚头,这里预应力钢筋

纵横交错,钢筋密集,锚垫板下通常还设置有螺旋筋或钢筋网,所以,振捣时须特别认真,一定要振捣密实,切勿出现漏振式空洞,为日后张拉留下后患,必要时,可用高标号小石子混凝土进行浇筑。

由于构件预制高度较大,为减少构件脱模装车时的难度,除在吊机前方预制的构件,采用吊机起吊脱模,因而可以采用叠式预制外,其余构件均采用单层预制,以便脱模装车。

### 3. 底模

预制构件的底模,多采用浆砌土模,即底模四周用砖砌,再用土石填心,并适当加以夯实,顶面用水泥砂浆抹平,并涂以脱模剂或铺设隔离层。抹平层应有足够的强度,以便脱模和重复使用。如采用千斤顶脱模,土模高度应能安置和使用千斤顶,且千斤顶位置处的土模基层应有足够的强度。当下弦杆件采用立式预制时,底模顶面应做成弧形,将各点的放样坐标换算成高程,以控制弧度。

也有采用钢管支架上铺垫钢模作为底模的,这时,侧模的内、外模均采用钢模,并用钢管支撑。侧模设计应有微调装置,以确保预制构件的精度。

### 4. 桁式组合拱桥的构件预制,还需注意:

(1)预制场可以布置在边孔岸坡上,也可布置在主、边孔已成桥面上。桁片一般采用单层预制,在预制场上必须按照吊装先后顺序排列。顶、底板可采用叠式预制,后吊装的要放在底部先预制,先吊装的要放在顶部后预制,叠式预制也不能太高,以便脱模移运。

(2)桁片预制构件上,有顶底板、横向联系、牛腿、吊机底座等的预埋件,预制时要千万注意,切勿遗漏。

## (三) 构件移运

### 1. 脱模

构件脱模方式因预制场地不同而异。如构件在吊机前方(已成桥面或桥下岸坡上)预制,则可将构件吊环直接系于吊机、吊索上起吊脱模。如构件未设吊环,则可将构件吊点位置的土模凿出一个槽,穿索捆绑后,由吊机起吊脱模。

如构件在吊机后方预制,则不能利用吊机起吊脱模,通常采用千斤顶脱模。千斤顶的安放位置要通过计算确定,一般采用2点顶(每点横向可设2个千斤顶),这样受力明确。如构件过长、过重,也可采用3点或4点顶,千斤顶和构件之间要加一钢板垫块,以扩大支承受力面,避免局部应力过大导致构件压裂。顶的过程要有专人指挥,做到每个千斤顶同步受力,避免起顶不同步造成构件扭曲和开裂。

### 2. 移运

构件移运除了常用的拖板滚筒运输、轨道平车运输和船运以外,下面介绍一种桁式

组合拱桥工地常见的运输方式 托架滚筒运输(图 5-3-8)。

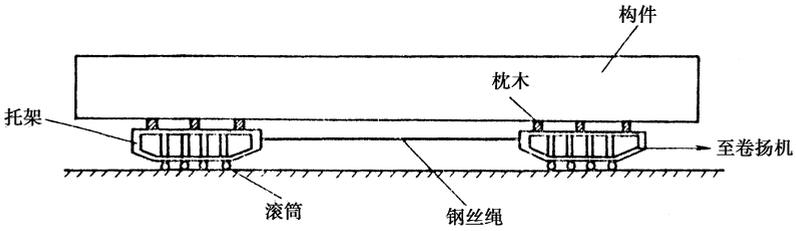


图 5-3-8 构件移运

江界河大桥工地 移运构件最重为 126t, 构件最长为 38m, 构件移运时采用 2 点支承 (支承位置由计算确定), 每一点采用 2 个托架并列, 托架设计时考虑了运行时的不平衡因素, 按每个托架承 500kN 计算。前后两排托架可用钢丝绳连起。托架上垫枕木, 使构件支承于枕木之上。托架下面垫滚筒, 滚筒采用  $\phi 114\text{mm}$  ( $\delta = 8\text{mm}$ ) 无缝钢管, 内灌混凝土。用卷扬机牵引前行, 边行走, 边垫滚筒。构件行走的方向, 可通过支垫滚筒的方向加以局部调整。要求移运道纵、横向平整, 有竖曲线时要平滑过渡, 以减少移运时的振动。如移运道为下坡, 则须在后组托架上加尾梢, 以防不测。

该桥的移运道, 有一段是在未加上弦顶板的范围内(未加上弦顶板的目的是减轻半跨最大悬挂时的悬挂质量), 采用的方法是在两桁片间由特制的支架和轻轨组成移运道 (图 5-3-9), 支架设计时应考虑一定的冲击系数。构件在这段移运道上运行时, 要求放慢速度, 以减少振动。

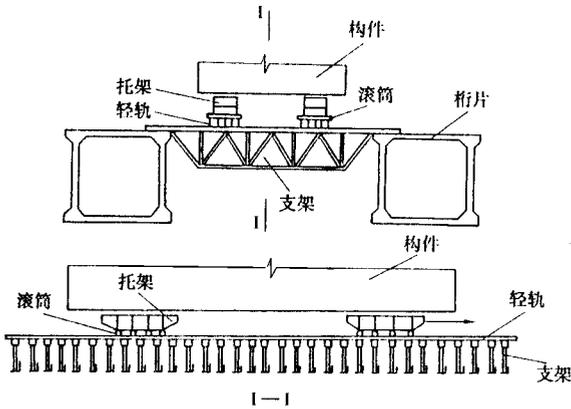


图 5-3-9 临时支架移运构件

## 第二节 钢管混凝土拱桥成桥施工

### 一、钢管混凝土拱桥成桥技术简介

钢管混凝土应用于拱桥有两大类型,一种是钢管外露的,钢管以参与结构受力为主,同时也是施工过程的支架和浇筑管内混凝土的模板,成桥过程先合拢钢管骨架,再浇筑管内混凝土形成主拱圈;另一种钢管以施工受力为主,当然也参与成桥的受力,成桥过程先合拢钢管骨架,然后浇筑管内混凝土形成钢管混凝土劲性骨架,再将钢管混凝土劲性骨架作为埋置式拱架浇筑外包混凝土,形成主拱圈。显然利用钢管骨架或随之形成的钢管混凝土作为劲性骨架,较之传统的型钢骨架,大大地减少了用钢量,减轻了骨架的重量。因为拱桥劲性骨架施工的主要危险在于失稳,刚度要求突出,钢管和钢管混凝土能较好地解决刚度问题。

钢管混凝土拱桥的施工方法本质上是劲性骨架方法,虽然钢管骨架较之钢筋混凝土轻许多,但跨径增大以后,钢管骨架本身的架设也具有很大的难度,对于100m以下的跨径,钢管骨架一般分为3段,吊装质量一般仅十几吨,可根据实际情况采用浮吊、汽车吊等进行吊装,边段用扣索扣住进行合拢,也可以采用少支架支撑,如天津彩虹桥和江苏泰州引江河大桥。个别桥梁采用支架施工,如福建安溪铭选大桥,在支架上高空焊接一节一节钢管成拱。这种方法既没有发挥钢管作为劲性骨架的优势,质量又无保证,应该避免。对于跨径在50m左右的,架设方法更为灵活。当跨径超过百米以后,常用的架设方法,主要是缆索吊装和转体施工方法,在条件许可的地方还提出了整体吊装和分段吊装的施工方法。

钢管混凝土拱桥的施工方法是典型的结构组分不断增加的自架设方法,主拱圈的截面是不断形成的,截面中先后施工的材料先后受力,因此,施工加载程序对施工过程和成桥受力有很大的影响。

### 二、缆索吊装法

缆索吊装施工方法是我国修建大跨度拱桥的主要方法之一。四川宜宾马鸣溪金沙江大桥,为净跨150m钢筋混凝土箱拱,分五段吊装,块件重达70t。福建南平玉屏山大桥,净跨100m箱肋拱,分五段吊装,块件重达59.1t。将钢管混凝土应用于拱桥中,需要

架设的钢管骨架比肋拱的质量轻很多,因而跨径可以增大。广东高明大桥、南海佛陈大桥 ( $L = 112.8 \text{ m}$ )、三山西大桥 ( $L = 200 \text{ m}$ )和广西邕宁邕江大桥 ( $L = 312 \text{ m}$ )均采用缆索吊装,四川万县长江大桥 ( $L = 420 \text{ m}$ )也采用缆索吊装,分 11 段,段长 40m,吊重仅 50 余吨。

当跨径不大时,拱肋分三段吊装,两边段吊装后斜扣索扣住,横向加浪风。一般情况下,应该双肋吊装、双肋合拢,两肋之间设临时横撑,或将横撑临时固定;但双肋吊装、双肋合拢的吊装质量较大,段与段之间的拼装难度也较大,若拱肋宽度较大(如桁式),则可采用单肋合拢。在合拢之前各段之间的接头为上开口,要注意接头的传力情况;为合拢方便,各段应略有上抬,合拢后逐步落下,调至设计标高(留预拱度);联接各接头和横撑,封拱脚成无铰拱,然后进行管内混凝土浇筑。

当跨径较大,钢管劲性骨架节段多、质量大时,缆索吊装方法需在传统方法和基础上加以改进,采用一些新技术、新工艺。

### 三、转体施工法

转体施工法是将拱圈分为两个半跨在两岸制作,通过转体合拢的一种施工方法。拱圈绕拱座做竖直旋转合拢的称为竖向转体施工法,拱圈绕拱座做水平旋转的称为平面转体施工法。

竖向转体施工法先在国外出现,它是在竖向位置利用地形或搭支架浇筑拱肋混凝土,然后再从两边逐渐放倒预制拱肋搭接成桥的施工方法,见图 5-3-10。50 年代意大利曾用此法修建了多姆斯河桥等,跨径达 70m;采用此法修建的跨径最大的是德国的 Argentobel 桥,跨径达 150m;我国用竖转施工法修建了跨径 60m 的四川杨家沟桥和三滩沟桥。竖转施工法当跨径增大以后,拱肋过长,则竖向转动不易控制,施工中容易出现问題,因此一般只在中小跨径拱桥中应用。

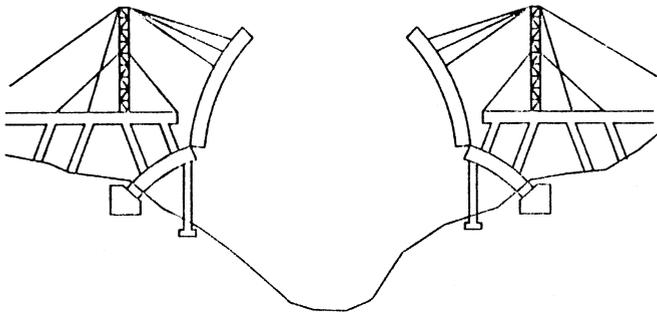


图 5-3-10 竖向转体施工法

平面转体施工法是我国首创的施工方法。随后,这一方法在我国的钢筋混凝土拱桥

中得到推广应用。平面转体施工法根据是否采用平衡块来防止转体过程中的倾覆,又分为平衡重转体和无平衡重转体。

平衡重转体主要由平衡体系、转动体系(转轴、环道)和位控体系三部分组成。其平衡体系一般利用桥台或配重来平衡悬臂主拱,主拱与桥台一起转动,如图 5-3-11 所示。

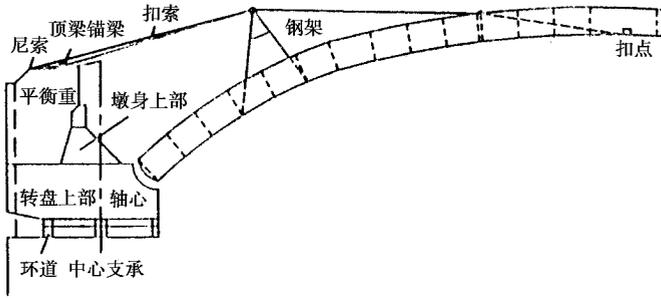


图 5-3-11 平衡重(平面)转体施工法

平衡重转体施工方法,跨径增大后,因平衡重而大大增加了转体质量,给转盘的设计、制造和转动、控制都带来很大困难,而且增加了材料的费用,因此随后又发展了无平衡重转体施工方法。

无平衡重转体施工法采用锚碇体系平衡悬臂主拱,取消平衡重。锚碇体系通常由作为压杆的立柱、作为撑梁的引桥主梁以及后锚等部分组成,如图 5-3-12 所示。1990 年建成的四川涪陵乌江大桥,采用无平衡重的双箱对称同步转体施工方法,跨径为 200m,使我国钢筋混凝土拱桥的跨径跃上 200m 大关。

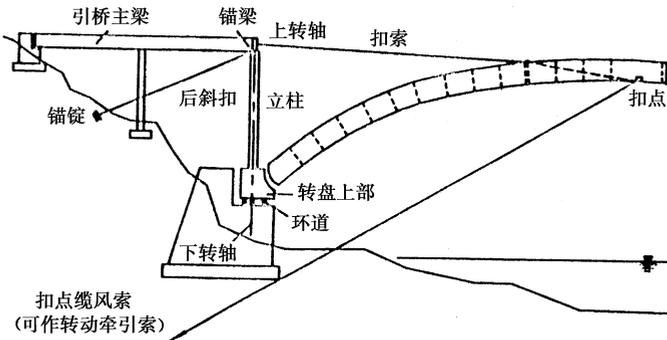


图 5-3-12 无平衡重(平面)转体施工法

对于多跨或带悬臂半跨的拱桥,还可以利用结构自身的质量采用自平衡转体施工方法。

转体施工法主要应用于拱桥之中,但也已推广至其他桥梁,如 T 构或斜拉桥。1995

年建成的广东南海雅瑶大桥,为一 T 构,转体质量达 4000t,贵州都拉营大桥 T 构转体质量则达 7100t。据不完全统计,我国采用转体施工法建造的桥梁,已达 50 余座。

转体施工方法也被广泛应用于钢管混凝土拱桥之中,当桥梁跨径相当时,钢管混凝土拱桥与钢筋混凝土拱桥相比,其转体质量是钢管骨架,因此比钢筋混凝土拱桥轻很多;当转体质量相当时,钢管混凝土拱桥的跨径就比钢筋混凝土拱桥大很多。

转体施工法在钢管混凝土拱桥的应用中,除上述因钢管混凝土拱桥自身的优势使跨径有很大突破外,在转体质量、施工工艺、施工方法等方面均有新的突破。

### 第三节 预应力混凝土斜拉桥施工

#### 一、基本特点及其发展

表 5-3-1 预应力混凝土斜拉桥基本特点及其发展

项目	桥型特点、适用范围及其发展
斜拉桥基本原理	斜拉桥亦称斜张桥、斜缆桥或牵索桥等。它是以通过或固定于桥塔(索塔)并锚固于桥面系的斜向拉索作为上部结构主要承重构件的一种新结构。它不仅用高强度缆索代替桥墩,又使桥面系处于预应力工作状态,因而是一种理想的适应大跨径桥梁和更有效地利用结构材料的新桥型
主要特点及适用范围	斜拉桥具有建筑高度低、跨越能力大、安全通航好、造形美观、材料省、造价低、养护简便、能限制噪音,并可悬臂拼装进行无支架施工等特点。适宜于河宽、水深、地质条件差、施工工作面窄和桥下通航要求高、桥址附近接坡少的地区应用,所以这种桥型用于修建大跨度公路桥、城市桥和铁路桥对以及立交桥、跨线桥和人行桥等最为合适
发展情况概要	国外从 1955 年建成第一座斜拉桥以来,在理论分析、结构构造和施工工艺各个方面都取得了显著的进步。我国自 1975 年建成四川云阳斜拉桥以来,斜拉桥技术发展很快,特别是预应力混凝土斜拉桥发展更快。1987 年,天津永和桥建成,为当时我国最大跨度的预应力混凝土斜拉桥,该桥主跨 260m,全长 500m,桥宽 11m,塔高 50.59m,曾一度为亚洲地区同类型斜拉桥之最。1988 年和 1993 年上海先后建成南浦大桥和杨浦大桥,其主跨前者为 423m,后者达 602m,南浦大桥全长 8346m,主桥 846m,通航净空 46m,主塔为折线 H 型,塔高 150m,杨浦大桥全长 7658m,主桥 1172m,通航净空 48m,主塔为钻石型(倒 Y 型),塔高 220m。两桥均为双塔双索面叠合梁结构斜拉桥,二桥均为 6 车道,桥宽 30.35m。五年间连续建造两座具有国际水准的大型斜拉桥,其速度之快,是国内外桥梁建设上罕见的。在规划、设计、科研、新材料和新工艺、新产品的应用以及施工质量方面取得了引人注目的成绩。1994 年 6 月在上海召开的斜拉桥国际学术交流会,引起世界各国桥梁工作者的极大关注

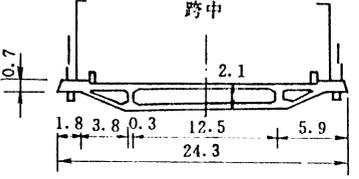
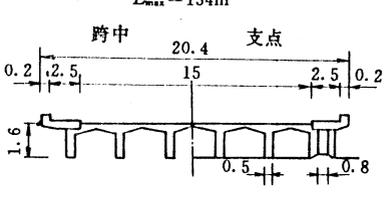
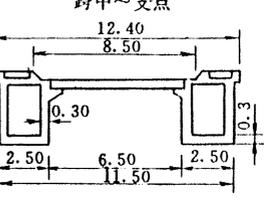
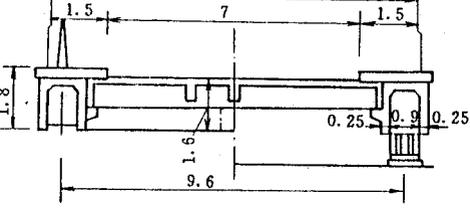
#### 二、组合体系三要素

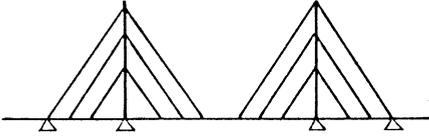
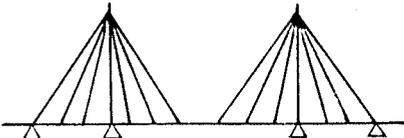
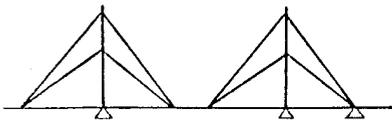
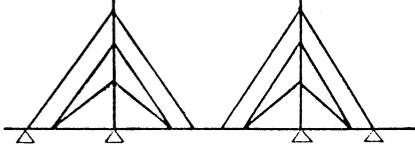
斜拉桥是一种范围相当广泛的桥梁组合体系。索塔、缆索、主梁三要素是区别于其

他结构型式桥梁的主要构件。由于三者的不同类型及其相互结合,形成种种各具特点的桥型。

表 5-3-2 斜拉桥组合体系三要素—主要构件

项目	型式、内容与实例简述
斜拉桥的主梁选用 截面 箱梁、工字梁特点	<p>主梁的截面为箱形、工字形或箱形与工字形并用,前三者占绝大多数,也有少数斜拉桥的主梁用空心板梁或桁架的</p> <p>箱梁的特点是抗扭刚度大,横向刚度也较大,能适用于跨度大、桥面宽的桥梁的多种斜拉桥应用,可通过设置横梁或横撑,使斜拉桥的斜缆索的拉力传递到主梁上,这样一面或两面锚固缆索均可。</p> <p>工字梁的特点是横向刚度小,但通过设置横隔板可提高刚度,工字梁比较轻,从短跨到长大跨均能适用。</p> <p>箱梁和工字梁均能预制化生产,用预制构件施工能够进行悬臂拼装并可现场浇筑悬臂架设,有利于施工</p>
斜拉桥的主梁选用 跨径概估 最大跨长与梁高	<p>斜拉桥的跨径可分为:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 两跨对称式和非对称式;</li> <li>2. 3跨结构。</li> </ol> <p>已建成的桥梁调查结果表明:两跨桥 <math>C/L</math> (跨长/桥长) 为 0.52~0.65;</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>3. 桥跨大约为 0.5~0.6</li> </ol> <p>跨径(最大跨长 <math>C</math>)与梁高(<math>H</math>)的关系 <math>C/H = 1/50 \sim 1/100</math>, 预应力混凝土斜拉桥约为 <math>1/40 \sim 1/200</math>。对于公路桥,主梁为箱形截面的多索式 3 跨预应力混凝土斜拉桥, <math>C/H</math> 以 <math>1/80 \sim 1/100</math> 为佳。</p> <p>斜拉桥的主梁一般做成等高的,不等高的变化幅度也很小</p>
斜拉桥的主梁实例 密索式大跨预应力混凝土梁简图	<p style="text-align: center;">预应力混凝土斜拉桥典型主梁截面</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="140 1281 588 1621"> <p style="text-align: center;">麦廷桥 <math>L_{max} = 145m</math></p> </div> <div data-bbox="604 1281 1036 1594"> <p style="text-align: center;">市罗顿纳桥 <math>L_{max} = 320m</math></p> </div> </div>

项目	型式、内容与实例简述					
斜拉桥的主梁实例	预应力混凝土斜拉桥典型主梁截面					
	 <p style="text-align: center;">跨中</p> <p style="text-align: center;">帕斯科-发尼威克桥 <math>L_{max} = 299m</math></p>	 <p style="text-align: center;"><math>L_{max} = 134m</math></p> <p style="text-align: center;">跨中 20.4 支点</p> <p style="text-align: center;">切夫桥 <math>L_{max} = 144m</math></p>				
斜拉桥的力学性能	 <p style="text-align: center;">跨中~支点</p> <p style="text-align: center;">查尔科桥 <math>L_{max} = 245m</math></p>	 <p style="text-align: center;">跨中 10 支点</p> <p style="text-align: center;">切夫桥 <math>L_{max} = 144m</math></p>				
	<p style="text-align: center;">斜拉桥使用的主梁截面型式</p>					
斜拉桥的斜拉索布置	<p style="text-align: center;">斜拉桥使用的缆索类型</p>					
	<p>斜拉桥使用的缆索有封闭式缆索(L.C.R)平行钢丝束(P.P.W.S)钢绞线及H型钢等。我国则多采用平行钢丝束,上海南浦大桥最粗索 <math>D = 146mm(265\phi7</math> 镀锌高强钢丝)杨浦大桥最粗索 <math>D = 155mm(301\phi7</math> 镀锌高强钢丝)封闭式缆索及平行钢丝束的弹性模量或抗疲劳强度尽管有差别,但对其经济影响则很小</p>					
	<p style="text-align: center;">缆索的截面与弹性模量的比较</p>					
	<p style="text-align: center;">缆索类别</p>	<p style="text-align: center;">缆索截面</p>	<p style="text-align: center;">缆索最大容量 (t)</p>	<p style="text-align: center;">平均抗拉强度 (MPa)</p>	<p style="text-align: center;">弹性模量 (MPa)</p>	<p style="text-align: center;">防锈处理</p>
	<p>螺旋封闭式缆索(L.C.R)</p>	<p>圆线层+T线 1层+E线2层</p>	<p>827 (100mm)</p>	<p>1138~1275</p>	<p><math>1.57 \times 10^8</math></p>	<p>油漆</p>
<p>平行钢丝束(P.P.W.S)</p>	<p>采用 <math>\phi 5mm</math> 镀 层钢丝组成</p>	<p>668 (P.W.S-217)</p>	<p>1569 以上 1765 以下</p>	<p><math>1.96 \times 10^8</math></p>	<p>塑料护套 缠胶带等</p>	
<p>螺旋扭绞钢缆绳</p>	<p><math>1 \times 127</math></p>	<p>333(62mm)</p>	<p>1304~1432</p>	<p><math>1.57 \times 10^8</math></p>	<p>油漆</p>	
<p>钢绞线扭绞钢缆</p>	<p><math>7 \times 37</math></p>	<p>324(70mm)</p>	<p>1275~1373</p>	<p><math>1.37 \times 10^8</math></p>	<p>油漆</p>	

项目	型式、内容与实例简述		
斜拉桥的斜缆索布置	斜缆索布置简图及说明		
	布置形式	示意图	说明
	竖琴形 (平行线形)		<p>竖琴式的下部拉索比起辐射形和扇形工作效率大为减少,因而要采用较高的索塔,采用高索塔致使由中间缆索和下部缆索而引起的高索塔中的弯矩增大。但索塔的高度增加,缆索的拉力即须进行调整,因而,索塔的横截面可以采取同一形式。竖琴式可简化缆索与索塔之间关节点的结构设计,且能实现主梁和索塔的分段安装</p>
	辐射形 (扇形)		
	星形 拉索在桥面系交叉)		
混合形			
塔位与布索	<p>索塔位置直接与布索有关。当塔柱仅布置在主跨两端时,斜拉桥可以是对称的、也可以是半对称的。当两索塔是只从主跨的一端布置时,斜拉桥可以是不对称的。除特殊情况外,对称和半对称的斜拉桥在安装上是最经济而简单的</p>		
斜拉桥的索塔及其连接	<p>斜拉桥常用的塔柱类型,在顺桥方向可分为柱型和 A 字型两种;在横桥方向,可分为单柱形、双柱型、门型或斜腿门型、倒 V 型或倒 Y 型等。从索塔(塔架)与缆索构成的形状看:1. 倒 Y 型及斜门型在构造上必然是辐射形、扇形;2. 独柱时,则不限于某种形状,但多采取辐射形(扇形);</p> <p>索塔与缆索的连接方式有全固定、部分可动、全部可动三种。由设计根据斜张桥结构特性,并从主梁截面、缆索形状、塔身形状、抗震性、抗风性、温度影响、经济性、施工条件以及美观要求等综合考虑,研究确定</p>		

项目		型式、内容与实例简述				
斜拉桥的索塔类型	塔架种类及其连接	塔(塔架)种类简表				
		钢索	连接情况	固定于桥墩上	铰接于桥墩上	与主梁刚性连接
			柱型			
		双面缆索 (复列)	门形柱			
			2根独立柱			
			斜门形柱			
		主体钢索	倒V形			
			倒V形			
		单面缆索 (单列)	独柱			

### 三、索塔施工

表 5-3-3 斜拉桥索塔施工方法及注意要点

项目	索塔施工方法及注意要点		
索塔施工 与桥位复 测要求	斜拉桥索塔施工与高桥墩的施工要求基本相同,由于索塔有多种型式,因此应根据不同索塔型式确定相应的施工方式方法。为了保证斜拉桥施工工程质量都应着重控制构造物各部的平面位置、高度、尺寸,并首先对斜拉桥桥位进行复测。复测精度应符合下列要求方可作为具体依据		
	斜拉桥桥位复测精度要求(JTJ041-89)		
	桥中线桩间距离(m)	基线相对中误差	桥中线相对中误差
	≤200	1/25000	1/10000
	201~500	1/50000	1/20000
	>500	1/80000	1/40000
注:采用电磁波测距仪直接复测桥中线时,应符合表中桥中线相对中误差的规定			

项目	索塔施工方法及注意要点
索塔施工定位与安全作业	<p>索塔一般采用现场浇筑钢筋混凝土或部分预应力混凝土结构,因其高度较高,故对平面位置、轴线控制、截面尺寸、预埋件制作、安装精度等均有较高的要求。且索塔施工系属高空作业范畴,为此施工更应特别注意严格遵守有关高空作业安全技术规定</p>
索塔施工常用方法	<p>混凝土、钢筋混凝土和预应力混凝土索塔可按下列方法施工:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 整体搭架分节立模浇筑法,宜先设置支架,一般可用万能杆件、装配式公路钢桁架片或组合型钢安装;</li> <li>2. 潜升模板法,滑动模板在结构上应有足够强度、刚度和稳定性,每段模板高度一般为1~1.5m,滑动模板的支承杆及提升设备应能保证模板竖直均衡上升。为使模板不致发生倾斜和扭转,宜采用油压千斤顶同步提长(提升时速宜在10~30cm/h),并应连续进行,以免中断(中断时亦应缓慢提升)不致使混凝土粘住模板。此外,当因故中断时,在中断前亦应将混凝土浇筑齐平;</li> <li>3. 采用装配式预应力混凝土预制块件逐节吊装,然后在块件预留上下贯通的孔道内穿入预应力钢材后张拉锚固</li> </ol>
塔脚为铰接时	<p>塔底与桥墩为铰接的索塔,施工过程中(在安装或浇筑塔身时)应将塔身按设计位置临时固定、不使动动摇,以保证安装质量,塔身建筑到一定高度后,应采取稳定措施或设置缆风,待斜缆索全部安装并张拉完成后,方可撤除缆风并恢复铰接</p>
塔、墩或塔、梁固结	<p>塔、墩固结的索塔,采用固定支架施工方案时,施工支架宜在墩上架设。塔、梁固结的索塔,施工支架宜在梁上搭设。如果梁体采用悬臂施工法,而且索塔与悬臂梁段交错施工,浇筑的塔段要配合索塔摆动向上延伸时,应在支架与浇筑的索塔间留出活动空隙,以免支架阻碍索塔的摆动</p>
索塔施工主要部分要求	<p>当采用两种不同材料搭设支架时,相互之间的牢固连接是支架整体稳定的关键,必须采取可靠措施予以保证;</p> <p>支架和操作平台应有足够的强度和刚度,并应设置安全护栏。支架还应具有足够的抗风稳定性,一般宜间隔5m高度与索塔连结;</p> <p>支架顶端应有防雷击装置。当用竹、木等易燃材料作为护栏或走道板时,应在间隔一定高度的适当位置配备消防器材,以策安全;</p> <p>为配合模板及张拉千斤顶的垂直提升,支架与索塔的距离宜在50cm左右,在此间距中应配置可靠的安全网</p>
斜缆索管道	<p>安设锚箱中的斜缆索管道时,应设置稳固的钢筋骨架固定管道,防止其在浇筑混凝土时移位。在管道测量定位时,应考虑斜缆索因自重下垂而导致其端部角位移时的方向、位置、标高的改变。缆索管道的位置、标高和角度的容许偏差值应按设计规定</p>
塔身浇筑	<p>塔身浇筑混凝土时应注意掌握均匀分层,由跨中向两端的原则。每次浇筑的混凝土均应在混凝土的初凝时间内完成,并注意及时加强养护</p>

四、主梁施工

表 5-3-4 斜拉桥主梁施工方法及注意要点

项目	主梁施工方法及注意要点
主梁施工可采用的方案	斜拉桥的主梁施工,可采用悬臂浇筑、悬臂拼装、纵向顶推、横向顶移、在支架上架设安装、在支架上就地浇筑等方案,一般可根据设计原则和具体条件进行技术经济比较抉择
采用挂篮悬臂浇筑法的有关要求	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 当塔、墩设计为固结,主梁设计为悬浮,在墩顶或横梁上施工时,应在梁下设置临时支座,并在斜缆索安装张拉调整和主梁合拢后立即撤除;</li> <li>2. 桥墩两旁的梁段(0号段、1号段),一般采用在墩旁托架(扇形支架)上浇筑。在扇形托架上浇筑主梁的长度,要满足今后拼装挂篮所必需的装架场地,同时亦应满足设计计划块的要求;</li> <li>3. 托架(或支架)应有足够的强度、刚度,为减少节点压缩变形,一般宜采用钢结构的扇形托架;</li> <li>4. 挂篮全部杆件制成后,应经试拼装,发现问题及时处理,然后在桥上组装,组拼后再按设计荷载进行预压,测定挂篮的弹性挠度,并消除其非弹性挠度;</li> <li>5. 箱形截面混凝土浇筑顺序,应按设计要求办理,当采用两次浇筑时,各梁段的施工缝应错开;</li> <li>6. 浇筑梁段混凝土时,应根据挂篮前端的弹性挠度,各阶段梁的弹、塑性变形设置预留高,其抛高值,可通过几次实测调整使之与实际下降值基本一致;</li> <li>7. 当梁段混凝土浇筑完成后,应及时进行清孔工作,并在混凝土达到设计强度后,立即进行预应力钢材的张拉和压浆;</li> <li>8. 在完成预应力钢材的张拉和压浆后,可进行斜缆索的安装及张拉</li> </ol>
采用悬臂浇筑主梁法有关要求	<p>采用悬臂浇筑斜拉桥主梁,为防止合拢段接缝处的开裂,对合拢段施工应注意下列要求:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 观测、了解合拢前的温度变化与梁端高程及其与合拢段长度变化的关系;</li> <li>2. 复查、调整两悬臂端合拢施工荷载使其对称相等,如不相等时,应用压重调整;</li> <li>3. 检查梁内预应力钢材(预应力钢束)是否张拉和压浆;</li> <li>4. 复测、调整中跨、边跨斜缆索的张拉力和悬臂的挠度及两端高差;</li> <li>5. 在合拢段处用型钢顶紧两悬臂端并锁定其长度。在锁定合拢段的同时,释放桥梁被临时固定的活动支座;</li> <li>6. 在一天中最低温度时浇筑合拢段混凝土,型钢处留出约10m宽的缺口;</li> <li>7. 待浇筑合拢段混凝土达到设计强度的80%时,从预留缺口切断临时锁定的支顶型钢,并用混凝土填补缺口;</li> <li>8. 张拉通过合拢段的预应力钢材</li> </ol>
采用在支架上浇筑主梁有关要求	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 合理设计混凝土级配,统筹安排浇筑顺序,紧凑浇筑过程,做到整个节段混凝土从最初浇筑以至浇筑完成在混凝土初凝时间以内;</li> <li>2. 应保证支架搭设牢固,注意地基是否需要加固,根据荷载要求确定加固方式进行必要的加固处理;</li> <li>3. 支架应经加载试验,可取梁体节段混凝土和所有施工荷载的总重量加载。使支架充分变形,卸载后,对变形后的支架予以调整;</li> <li>4. 浇筑箱梁混凝土时,应尽可能一次浇筑完成,梁身较高时亦可分二次或三次浇筑。分次浇筑时,浇筑顺序为:先底板及腹板根部,其次腹板,最后顶板及翼板。当浇筑完成并初凝后,即须覆盖表面、开始养护,连续湿润时期间应不少于7d(天)</li> <li>5. 在节段混凝土达到设计强度,并对预应力钢材的张拉和灌浆以及相对应的斜缆索安装、张拉完成后,可按规定顺序拆除支架</li> </ol>

项目	主梁施工方法及注意要点
采用预制梁段悬臂拼装法有关要求	1. 梁段拼接位置的中线水平方向容许偏差 $\pm 10\text{mm}$ ,梁段截面尺寸容许偏差 $\pm 20\text{mm}$ ,高程容许偏差 $\pm 10\text{mm}$ ; 2. 复测斜缆索张力 ,容许偏差为 $\pm 5\%$ ; 3. 有斜缆索孔道的梁段 ,应在试拼时 ,复核孔道方向 ,调整到悬臂施工挠度位置上 ; 4. 梁体在悬臂施工状态应考虑计算梁段的角位移值和线位移值
采用纵向顶推法有关要求	跨线斜拉桥的钢结构主梁或预应力混凝土主梁 ,均可采用纵向顶推法施工 ,顶推跨径较大须设临时支墩时 ,其墩位可按地形与河床条件选择 ,宜配合斜缆索在梁上的锚固点设墩 ,以便以后调整梁的高程与缆索拉力时可在墩上操作 ; 有关主梁顶推方法 ,可参见顶推安装有关要求

## 五、斜缆索的制备

### (一)斜缆索制作

表 5-3-5 斜缆索制作有关要求

项目	斜缆索制备有关要求
斜缆索及其制作区分	本表所述斜缆索系指由高强钢丝为材料的斜缆索 ,其类型为平行钢丝束及绞制工艺和热挤聚乙烯护套等工艺制成的钢绞线(索) ,前者多为工地现场制作 ,后者则为工厂制作 ,具有较高的内在质量和防腐能力 ,有条件时宜优先考虑采用
斜缆索色彩要求与制作	由聚乙烯材料作护套的斜缆索均为黑色。当设计要求采用涂料涂成彩色外套时 ,应在斜缆索安装调试完成后进行 ,所用涂料必须具有抗老化的能力 ;当设计要求在工厂制索时直接制成彩色外套时 ,则可以两次挤塑的工艺 ,在黑色护套挤塑完成后 ,继续加挤所需的彩色护套
调查与防锈	未经镀锌的高强钢丝应堆放于室内 ,并防止潮湿锈蚀。使用前须注意调直 ,用调直机进行调查和除锈。经调直的钢丝其弯曲矢高 $\leq 5\text{mm/m}$ ,表面不能有烧伤发炎的痕迹 ,并在调直后的钢丝表面均匀涂抹防锈油脂
确定标准钢丝	每束斜缆索中应有 1 根钢丝在 $0.1R_y$ ( $R_y$ 为钢丝标准强度)应力下换算标准温度时的长度予以精确丈量后切断 ,作为该索的标准丝(样板丝) ,并在该丝两端涂色 ,用以区别于其余各根钢丝。其余各丝可略长于标准丝在通常情况下切断
平行钢丝索的制作	在编索平台上按锚板孔的位置将钢丝分层排列 ,并注意将标准丝安排在最外层 ,不可错位 ,然后用梳板将钢丝梳理顺直 ,再用特别的夹具 ,将梳理顺直的钢索夹紧定位 ,夹具间距一般可为 $2\text{m}$ 。夹紧的钢索断面应符合设计形状 ,且能保证钢丝之间相互密贴 ,无松动现象
内防腐处理	在夹紧定位后的钢丝束上须进行内防腐处理 ,一般可采用涂刷橡胶沥青防水涂料和包以玻璃纤维布的做法。要求涂料涂刷均匀 ,无空白漏涂现象。玻璃纤维布的包裹则应紧密重叠
平行索的内防护	平行钢丝索的外防护有多种处理方法 ,一般宜采用聚乙烯管作护套 ,安装后再在护套内压注特种水泥砂浆。因此 ,护套须能承受一定的内压并具有一定的防老化的能力。可根据设计所要求的直径与管壁厚度 ,由专业工厂制作 ,其分节长度可视工地现场及运输条件确定
护套安装	平行钢丝索的外防护是在内防护完成后 ,即可套入聚乙烯套管 ,要求将每节聚乙烯管接顺 ,并保持其接缝平整严密
堆放要求	平行索应保持顺直、平放、支点间距一般不应大于 $4\text{m}$ ,堆放场地要求干燥阴凉处所。堆放工地现场须有保护措施 ,以防碰撞、破损缆索表面

项目	斜缆索制备有关要求	
防锈、防伤	绞制钢索所用高强钢丝为未镀锌时,应用除锈、防锈油等作临时防腐措施;当采用镀锌钢丝时,亦须注意在放丝绞制过程中防止擦伤镀锌表层	
绞制要求	钢丝应按设计断面进行排列定位,不能错位。钢索绞制的角度须严格控制在 $2^{\circ} \sim 4^{\circ}$ 以内	
绞制钢索的制作	缠绕紧密	钢索绞制成型后立即绕上高强复合带2~4层,要求绕缠紧密,经绕缠后的钢束断面形状应正确,且钢丝紧密无松动现象。
	热挤护套要求	热挤护套可采用低密度聚乙烯或高密度聚乙烯材料。根据设计决定的材料性能选用。聚乙烯材料中应掺有一定比例的碳黑,以提高抗老化能力; 聚乙烯护套应紧裹在钢丝索外,在正常生产、运输、吊装过程中,不应脱壳。护套外观应光滑圆整,厚度偏差不大于1mm
	缆索长度	挤好护套后的缆索长度应大于成品索的设计长度,换算成标准温度在无应力状态下的长度,经精确丈量,复核无误后将两端切齐,要求端面与缆索垂直,不能歪斜

(二) 锚具配置

表 5-3-6 锚具配置有关要求

项目	锚具组成及配置有关要求
成品索的检验与编号	长度切割正确的缆索,应在两端配置锚具,锚具配置完成后即为成品索。每根索经检验合格后应按编号挂牌,并附检验资料作为产品合格证书的附件
冷铸锚具的组成及其相关要求	斜缆索的锚具大都采用冷铸锚具,每副冷铸锚具主要由锚环、锚板、约束圈、连接筒、螺母、后盖等部分组成。其所用钢材质量均应符合有关标准。锚环、螺母是冷铸锚的主要受力部件,应经探伤合格。冷铸锚具的主要部件的金加工误差应符合有关设计规定,同一规格冷铸锚具的同类部件,应具有互换性
表面处理	锚环、螺母、接口、后盖等部件,当设计需要镀锌处理时,其镀锌量应不少于 $150g/m^2$ 。不镀锌的部件应妥善堆放于室内,避免生锈,如设计采用发黑工艺时,则应注意润色一致
钢丝墩头技术要求	钢丝穿过墩板后应进行墩头,墩头直径要求不小于钢丝直径的1.5倍,高度不小于钢丝直径;头形目视正直,允许有小于0.1mm的纵向裂纹,不得有横向裂纹;钢丝在墩头夹紧部位不得有削弱断面。锚环孔眼直径应大于钢丝直径但不得超过0.4mm
冷铸料的组成和要求	冷铸锚具所有的冷铸料由环氧树脂、固化剂、稀释剂、增塑剂以及钢球等组成,所有的化工原料应符合有关工业标准,钢球应符合有关铸钢球的标准
冷铸料的级配和要求	冷铸料的级配应经计算确定,并应先作试块,当力学指标达到设计要求后方可采用。要求固化后的冷铸料在 $25^{\circ}C$ 时的抗压强度不应小于 $120MPa$ , $60^{\circ}C$ 时不应小于 $70MPa$ 。每灌制1只锚具应制作试块二组,在同等条件下升温固化
冷铸料的浇注	浇注冷铸料时,应先将锚具和钢丝束洁净无油垢(如锚环内应无锈、无油污、钢球应去锈去污等),并做好准备工作后,方能拌制冷铸料。冷铸料的配合应该精确计量,确保拌和均匀,然后浇注。冷铸料和钢球的浇注,须配备振动设备,确保浇注密实
已浇注锚具的升温固化	将已浇注完成的锚具垂直吊放入烘箱进行升温固化,烘箱宜有自动控制温度的装置,以控制温度的升降,对于升降温度必须按下列要求予以控制: 室温 $\xrightarrow{1h}$ $70^{\circ}C$ $\xrightarrow{2h}$ $140^{\circ}C$ $\xrightarrow{4h}$ $180^{\circ}C$ $\xrightarrow{5h}$ 自然冷却至室温

## (三) 预拉及成盘(成圈)

表 5-3-7 缆索预拉及成盘(成圈)要求

项目	缆索预拉及成盘(成圈)要求
缆索预拉及预拉索力	无论为工地现场制作的平行钢丝缆索或是工厂绞制的钢缆索,在两端配置上冷铸锚具后,每根缆索均应经过预拉,预拉索力一般为设计索力的 150%。经预拉后测定锚板的内缩值,不应大于 7mm(或根据设计规定),螺母与锚环应能灵活旋动
预拉加荷要求及索长塑性变形量	预拉所用的千斤顶应按规范规定校验、率定。加荷要缓慢、均匀。加荷速度应不大于 100MPa/min。加荷至初应力时(一般为预拉荷载的 5%~10%),测量该索长度,当加荷至设计索力的 150%时,持荷 5min,放松至初应力,再测量该索长,并计算其塑性变形量
缆索实际长度及容许差值 $\Delta L$	经预拉后缆索的长度即为该索的实际长度,应将该长度记入产品合格证书中,要求缆索的实际和设计长度的差 $\Delta L$ 小于下列规定: 索长 $L \leq 100\text{m}$ $\Delta L \leq 20\text{mm}$ ; $L > 100\text{m}$ $\Delta L \leq L/5000$
缆索的荷载试验	为检验缆索质量,可根据设计要求对缆索进行静载和动载试验。进行静载试验时,要求实际破断索力不小于钢丝束设计破断索力的 95%,破断时钢丝束的延伸率不小于 2%。钢丝束的破断索力根据钢丝的标准抗拉强度及所有钢丝的截面积计算而得。在进行动载试验时,加载的上限,应满足设计要求
缆索成盘或成圈及其吊运绑扎要求	平行钢丝束应保持顺直平放,而工厂制作的绞制钢索,则可按要求进行成盘或成圈,无论为成盘或成圈,其索圈的直径不能太小,一般宜大于索的直径的 30 倍。 当缆索成圈运输时,每盘索圈的绑扎不应少于 4 道,并为保护缆索表面不致受损,必须在索圈的外面包裹麻布之类的包装材料二层,要求包扎紧密,不露缆索表面。然后再在包装材料之外,在绑扎处垫衬橡胶之类的弹性材料,并宜绑扎时结合吊点考虑,以免另设吊点,有损索面

## 六、斜缆索的安装

表 5-3-8 斜缆索的安装要求

项目	斜缆索安装有关要求
安装方法和选用	斜缆索的安装,可根据索塔高度、斜缆索长度、缆索的刚柔程度、起重设备等条件和缆索护套的性能等情况选用。选用的安装方法,一般可为单点吊法、多点吊法、脚手架法、起重机吊装法及钢管法等。对于已制成较硬或脆的外防护缆索,不得采用单吊点法安装
在塔上张拉并向上安装斜缆索	如在塔上张拉并向上安装斜拉索时,塔上张拉端锚头上应安装连接器与引出杆,从锚箱管内伸出(引出杆所需长度与直径应根据计算确定)缆索吊升至引出杆的连接器处时,即可与缆索端的锚具连接。再由塔上锚箱内张拉千斤顶,将缆索张拉就位。缆索锚头引出就位后应将引出的千斤顶、引出杆、连接器等拆除,再按设计要求的索力进行纠正张拉

项目	斜缆索安装有关要求
在塔上张拉并向下安装斜缆索	如在塔上张拉并向下安装斜缆索时,可待缆索吊升至安装高度后,牵引钢丝绳可自塔上锚箱管道内引出并栓住张拉端锚具,配合起重机的提升将锚具自锚箱管道中伸出,并旋紧锚具的螺母,使之初步定位,然后再用特制的夹具将锚固端锚具伸入主梁锚箱的管道内并予以初步旋紧定位,然后再按设计要求的索力进行张拉
斜缆索安装、张拉顺序与张拉力控制	各斜缆索的安装、张拉顺序以及张拉力的调整次数应按照设计规定办理; 各斜缆索的张拉应按设计规定的张拉力控制,以延伸值作为校核。在斜缆索的张拉过程中,必须同时进行梁段高程和索塔变位的观测并与设计变位值比较。如果标高与张拉力有矛盾时,一般可以标高为主进行控制,但当实际张拉力与设计张拉力相差过大(一般误差控制在10%以内),应查明原因,并与设计单位商讨,采用适当方法进行控制调整
同步张拉的要求	索塔顺桥向两侧和横桥向两侧对称的缆索组应同步张拉,中孔无挂梁的连续梁与两端索塔和主梁两侧对称位置的缆索亦应同步张拉,同步张拉的缆索,张拉中不同步拉力的相对差值,不得超过设计规定。如设计无规定时,不得大于张拉力的10%,不同步拉力使塔顶产生的顺桥向偏移值不得大于 $H/1500$ ( $H$ 为桥面起算的索塔高度。此值见JTJ041-89)。两侧不对称的缆索或设计拉力不同的缆索,应按设计规定的拉力,分阶段同步张拉
各缆索的拉力测定和调整	斜缆索张拉完成后,应使用振动频率测力计(或索力测定仪、钢索周期仪、数字测力仪等可选用其一)测验各缆索的张拉力值,每组及每索的拉力误差均应控制在10%(如设计有规定时应按设计规定办理)。如有超过应进行调整。调整时可从超过设计拉力值最大或最小的缆索开始调整(放松或拉紧)到设计拉力。在调整拉力时应对应索塔和相应梁段进行位移观测。各斜缆的索拉力调整值和调整顺序应会同设计单位决定
锚具安装轴线与临时防护	斜缆索两端锚具轴线和孔道轴线容许偏差为5mm。锚具和孔道在未封口前应临时予以防护,防止雨水侵入和锚头被撞击
聚乙烯护套内压注水泥浆时的要求	由平行钢丝绳束作斜缆索,如采用聚乙烯护套时,一般在索力调整完成后用套管内压注水泥浆保护法。所用水泥应用525号水泥,水灰比不宜大于0.35,为尽量减少水泥浆的收缩率,宜掺入有微膨胀功能、又不腐蚀钢材的外掺剂。水泥浆的抗压强度应 $\geq 30\text{MPa}$ (或根据设计要求)。水泥浆的压注压力一般可控制在0.6~0.7MPa之间,并应自下向上压注,当索塔高度超过50m时,可分段向上压注。每次压注均应在压注段上端的透气孔溢出与压入相似稠度的水泥浆时,方能表明该段索长已压注密实。压注完成后应及时清除(冲洗干净)残留在缆索表面、塔身的水泥浆

## 七、施工质量要求

有关斜拉桥施工的部分质量要求,已于前述各节中有所提及,对于斜拉桥主要组成部分的索塔、主梁及斜缆索的各部容许偏差现摘引上海市市政管理局1993年《市政工程施工及验收技术规程》的有关规定如下。

表 5-3-9 索塔、主梁斜缆索的容许偏差

项目	序号	检查内容	容许偏差(mm)	检验频率	检验方法
I. 索塔	I-1	轴线偏位	10	每一对索距检验纵、横轴线各一次	用经纬仪
	I-2	横截面尺寸	$\pm 20$	每一对索距检验一次	用尺量
	I-3	倾斜度	$1.5H\%$ 且 $\geq 40$	每一对索距检验一次	用经纬仪
	I-4	塔顶高程	$\pm 20$	塔顶检验	用水准仪
	I-5	斜缆索锚固点高程	$\pm 10$	每根索检验	用水准仪
	I-6	斜缆索预埋管轴线偏位	$\pm 10$	每根索检验	用经纬仪
	I-7	梁横截面尺寸	$\pm 10$	每根横梁检验两点	用尺量
	I-8	横梁高程			用水准仪
II. 主梁	II-1	轴线偏位	10	每个节段检验一次	用经纬仪
	II-2	横截面尺寸	+5 -8		用尺量
	II-3	壁厚	$\pm 5$		用尺量
	II-4	长度	$\pm 10$		用尺量
	II-5	梁底标高	$\pm 20$		用水准仪
	II-6	节段高差	5		用尺量
	II-7	预应力筋管道位置	$\pm 10$		用水准仪
	II-8	斜缆索预埋管轴线偏位	$\pm 10$	每根索检验	用经纬仪
III. 斜缆索	III-1	1.5倍设计索力预拉后冷铸的锚板内缩值	$\leq 7$	每根索检验	用尺量
	III-2	索长 $L \leq 100\text{m}$ $L > 100\text{m}$	$\pm 20$ $L/5000$	每根索检验	用尺量
	III-3	索力偏差	10%	每根索检验	用测力仪

## 第四节 钢桥拼装架设施工

### 一、钢桥拼装原则和程序

#### (一) 拼装原则

(1) 一般是由下而上,先主要受力构件,后辅助构件,有秩序地进行拼装。

(2) 安装程序必须保证结构的稳定和不发生永久变形,并能保持或及时校正结构的预拱度和平面位置。

#### (二) 拼装程序

钢桥拼装程序,参见图 5-3-13

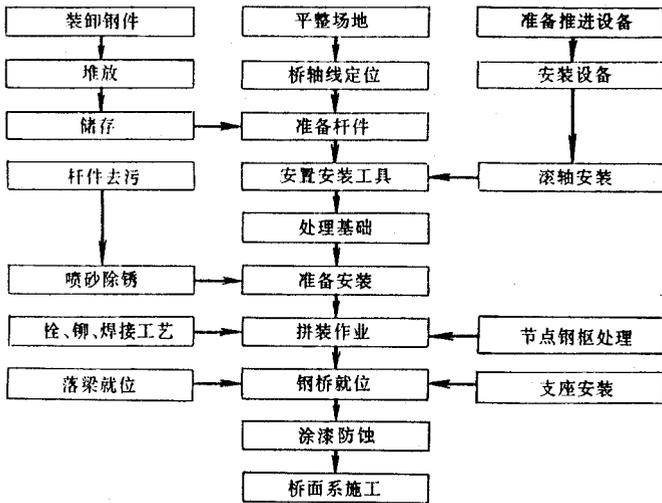


图 5-3-13 钢桥拼装程序

### 二、拼装用主要机具

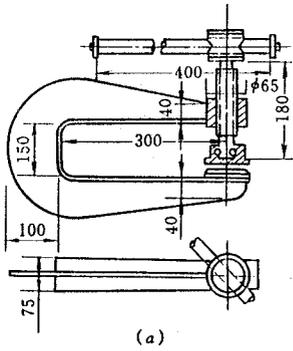
#### (一) 拼装机具

主要有推进设备,如摇滚、平滚和样盘等;安装工具如托梁、扳手、夹具、千斤顶绞车和各种起重机等。

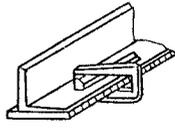
#### (二) 拼装加工夹具

(1) 铁楔夹紧器和螺栓夹紧器,主要用在两个部件夹紧在一起定位,以便焊接,如图

5-3-14。



(a)



(b)

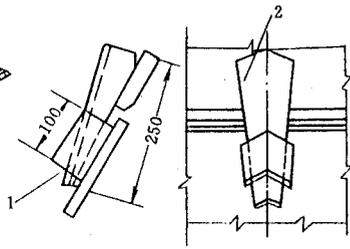


图 5-3-15 矫正楔

1—L100×100 2—L100×10 楔子  
单位: mm

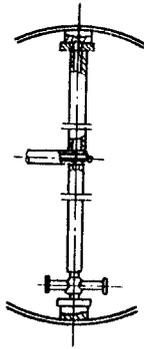


图 5-3-16 推撑器

图 5-3-14 夹紧器  
(a)螺栓夹紧器 (b)铁楔夹紧器  
单位: mm

(2) 矫正夹具, 适用于装配钢板结构的连接, 如图 5-3-15 所示。

(3) 正反丝扣推撑器, 适用于装配非直线体零部件, 调整缝和矫正体形之用, 如图 5-3-16 所示。

### 三、钢桁梁架设

#### (一) 浮运架设法

##### 1. 适用范围

当城市有江河穿过时, 在宽阔和较平稳的水平面上架设多孔简支梁桥适用浮运架设法。

##### 2. 主要程序

(1) 首先在岸边拼好钢梁, 然后将梁移至桥上游码头用大型吊机或浮吊装上浮船, 浮运至桥孔, 起吊就位。

(2) 浮运法架设钢桥主要程序, 参见示意图 5-3-17。

##### 3. 主要特点与要求

(1) 该法需具备能以简单方法, 将岸上拼好的钢梁移到浮船上, 并能保持浮运的稳定性和使钢梁平稳就位于桥墩上等条件。因此, 稳定性是该法施工的关键。

(2) 架设时要求水深在 2m 以上, 梁底至水面高度不大, 同时水位变化、流速、风力不大。

(3) 桥位附近有拼梁和布置滑道的场地。

#### (二) 拖拉架设法

##### 1. 主要程序

拖拉架设钢桥,一般以逐孔打桩,再在每孔设置一定数量临时排架的中墩,架设轻型导梁,利用对岸设的绞车或滑车组牵引结合顶推进行钢梁拖拉。

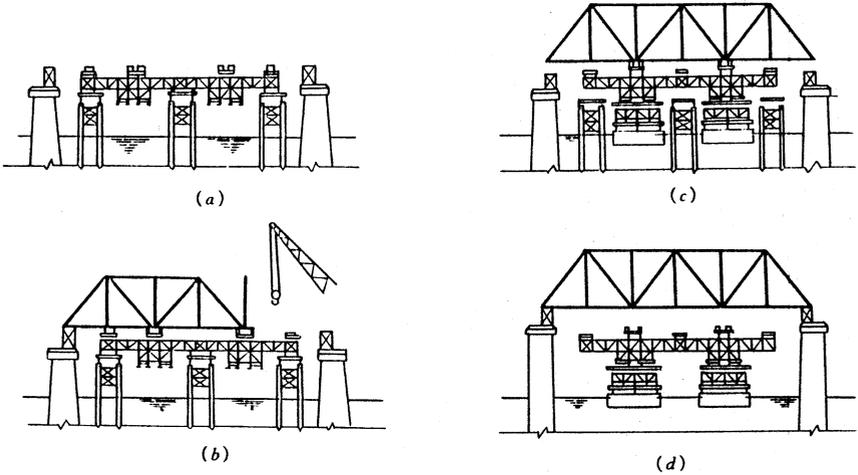


图 5-3-17 浮运法架设钢桥主要程序示意

(a)临时桩墩和拼装膺架 (b)用浮吊拼装钢梁;

(c)浮船组进入钢梁下进行浮运 (d)钢梁就位墩顶

## 2. 拖拉要求

(1)为了使钢梁能顺直抵达前方桥墩,并在风力作用下保持稳定,需采取措施如在导梁两侧和主梁尾端设置锚缆、绞车或设临时支架等,以稳定方向,控制速度和安全到位。

(2)钢梁的倾覆稳定系数不得小于 1.3。

### (三)伸臂架设法

#### 1. 主要程序

伸臂架设钢桥一般在膺架或排架上从边孔开始,先装锚孔,后装其他孔。一联梁装完,下一联必须与该联连接才继续安装。

#### 2. 施工注意事项

(1)钢梁整体常支承在未固定的临时支座上,以利随时调整。由于垂直和水平反力在各安装阶段不同,因此,应经计算并采取安全、可靠的措施,防倾覆和滑走。

(2)应注意荷载引起杆件内力的变化。

(3)用落低锚孔后支点的办法,使结构向上倾斜,以抵消一些伸臂端点的下挠度。

(4)正确对待长臂富有柔性的梁体晃动。

(5)注意风振对长伸臂和大挠度情况下安全作业的影响。

## 四、拼装就位施工要求和注意事项

### (一) 拼装一般要求

(1) 拼装程序必须保证结构的稳定和不发生永久性的变形,且能保证或及时校正结构的预拱度和平面位置。

(2) 安装前,应按照构件明细表核对进场构件和零件,查验出厂合格证,钢材材质证明书等。各杆件等在工地矫正、制孔、组装、焊接等均符合质量要求。

(3) 钢梁安装前,应对桥台、墩顶高程、中线及每孔跨径进行复测,不超过允许偏差后方可安装。

(4) 需采用临时支架时,应注意河床地质情况和可能遭受洪水,流水或漂流物的冲击,根据安装时的荷载情况作出支架结构设计,基桩轴向容许承载力的安全系数应大于 1.5 (基桩轴向极限荷载/基桩轴向容许荷载  $\geq 1.5$ )。

### (二) 拼装注意事项

(1) 拼装施工时,应尽快将主桁件拼成闭合三角形,并即安装纵横联结系,保证钢结构的空

(2) 拼装顺序按设计文件及预先制定方案进行,并应注意:

- ① 吊机的类型、运用方法、起吊能力及最大吊距;
- ② 钢梁杆件供应方法;
- ③ 先安装的杆件不得妨碍后安装杆件的安装和吊机的运行;
- ④ 尽量避免较长杆件处于悬臂状态,防止产生过大的拱度,影响桁架合拢;
- ⑤ 主桁杆件拼装应左右两侧对称地进行。

(3) 拼装用的冲钉其直径(中段圆柱部分)应较孔眼设计直径小 0.2~0.3mm,其长度应大于板束厚度;用的精制螺栓应较孔眼设计直径小 0.4mm,拼装夹板束用的粗制螺栓应较孔眼设计直径小 1.0mm。冲钉和螺栓可用 35 号碳素结构钢制造。

(4) 吊装杆件的吊钩,必须等杆件完全固定住后,方可卸去。

(5) 拼装应按节间依次进行(完成的节间应包括下弦、桥面系腹杆、上弦及上下横支撑等)。为使钢梁便于校核拱度,并保证安装的稳定性,安装进程中不得使未栓合的节间超过 2 个。

在悬臂安装中,主桁各大节点应一次栓合完毕。

(6) 正确合理的使用高强螺栓。

- ① 设专人检查,当天拧好的螺栓当天检查完;
- ② 主桁节点及箱梁、纵横梁连接处,每一螺栓群检查的数量为其总数的 5%,每个主

桁节点不得少于 5 个。如未按工艺要求施拧,应返工重拧后再检查;

③采用螺母退扣检查时,刚刚转动的扭矩值、超拧值或欠拧值均不大于规定值的 10% 者为合格;

注:规定值由施工单位通过试验确定。对已终拧的试验件经一定的时间后,用示力计扳手测定螺母退扣刚刚转动的扭矩值,即是所称的“规定值”(由于终拧后至测定的相隔时间不同,检查的扭矩值即规定值与终拧扭矩值是有差别的)。

④每个节点抽验的螺栓,其不合格者不得超过抽查总数的 20%,如超过此值,则应继续抽查直至累计总数 80% 的合格率为止,然后对欠拧者应补拧,超拧者应更换。

⑤检查高强螺栓的结果,应作记录。

### (三)落梁就位要求

(1)钢梁在落梁过程中,应保证其平稳下落,使钢梁各部杆件不超出容许应力。

钢梁就位前后,均应检查其建筑拱度和平面尺寸,并作出记录。

(2)拼装钢梁前应先清理支座垫石,其标高及平面位置应符合设计要求。支座底板与垫石之间的空隙应以高标号水泥砂浆垫实,砂浆厚度大于 40mm 时,应在砂浆垫层中设钢筋网。支座底板的安装应按设计文件办理。

(3)固定支座、活动支座均应按设计图安设。

①对于长跨度多孔钢梁,应掌握钢梁的制造标准温度及各桥墩中心顺桥向偏差数值,综合研究,再确定固定支座的精确位置,以免安装后,梁端空隙过大或过小。施工温度以桁梁下弦或箱梁底板实测温度为准。

②活动支座的辊轴位置(倾斜度)应符合落梁的温度及荷载量的要求。

③当采用盆式橡胶支座时,应参照有关规定进行。

(4)落梁时一般使用油压千斤顶。在同一墩台上只可在两处设置千斤顶并同时顶或落一孔梁的一端。顶梁的位置按设计图规定。设计图无规定时,应以不使钢梁鼓肚或变形为原则;一般可选在节点下或端横梁下顶落,必要时应在安放千斤顶处适当加固。

(5)在支架上顶落钢梁时,应按可能发生的最不利的受力情况验算支架结构的强度及稳定性。

## 第五节 地道桥顶进法施工

### 一、顶进法简述

顶进法是地下建筑物施工的一种基本方法。它的特点是不挖开地面或不中断地面

交通 在地面以下工作坑内将预制好的圆形涵管和矩形箱体,用机械力量顶入地层中(图 5-3-18)。此法主要用于不用爆破开挖的地质地层中,适于修建各种地下管道和穿越铁路或街道的各种桥涵、地道等。

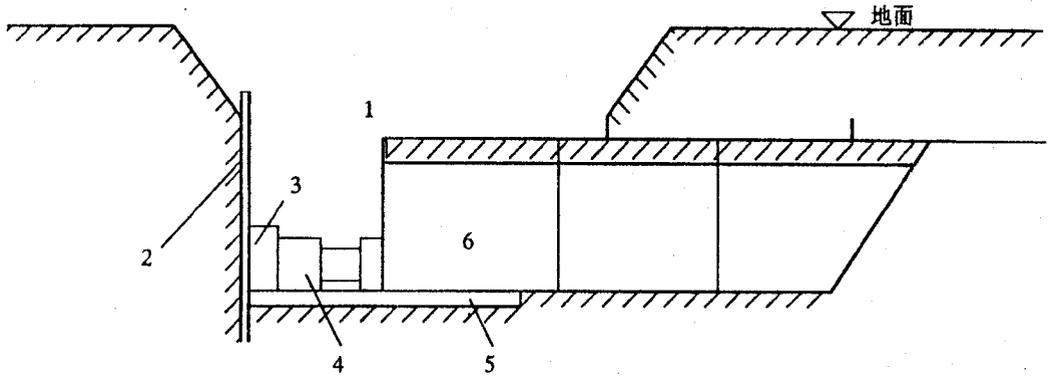


图 5-3-18 顶入法示意

1—工作坑 2—后背 3—后背梁 4—千斤顶 5—底板 6—箱体或涵管

顶进法是这类方法的总称,它可分为后顶法(顶入法)、牵引法、对拉法和顶拉法等几种,当管道较长时需分段制作,这时常需用中继间的分段顶入法。

按照顶进的地下结构的大小,可以分成箱涵顶进、管涵顶进及小口径管道顶进三大类,箱涵结构尺寸比较大,顶进工艺较复杂,顶进技术要求较高,是着重介绍的,至于顶管技术则针对其特点结合箱涵顶进作一般介绍。

在决定采用何种顶进施工方法之间,应对下列几个方面作充分调查:

- (1) 地形、地貌及工程地质、水文情况;
- (2) 有否需要拆迁的建筑物;
- (3) 铁路路基及工作坑中是否埋置有管路、电缆及其他障碍物,其位置、结构以及使用情况;
- (4) 施工场地、交通运输及供水、供电等情况;
- (5) 现有平交道的交通及铁路运行情况;
- (6) 周围地面排水情况。

根据调查情况,结合所需顶进的结构形式、尺寸、施工技术条件、机具设备能力等综合研究,经过技术和经济比较后决定合适的施工方法。

## 二、箱涵顶进

### 1. 箱涵顶进法的适用条件及其优越性

箱涵顶进是指在铁路、公路或其他地面建筑物下方,顶入预制的钢筋混凝土箱形框

架(箱涵),建成各种地下通道或地下建筑物。这种方法适用于:原有铁路和公路平交道口不能适应交通安全和车流畅通的要求而要改建为立交道口;有些客运大的车站需要增设地道;农田灌溉或通航需要增建穿越铁路的过水桥涵或过船桥涵;在处理旧线既有桥涵病害时,要求扩建或增建新桥涵;明挖法修建地下铁道,某些地段不能挖开路面等等。箱涵顶进法用的最多的是在既有交通线上增设立交桥。

修建立交桥的方法有许多种:中断交通,在拟定桥位处挖开路基建桥;修筑便线、便桥维持通车,在预定桥位处开挖路基建桥;用便梁承托线路维持通车,然后挖开路基建桥;先修建桥墩台,待桥梁墩台建成后架梁,最后开挖桥下土方;采用箱形墩台顶入路基再架梁,最后挖除桥下土方;限速行车,直接顶入桥涵。

上述诸方法中,顶进法具有很多优点,主要是不中断行车,安全可靠,施工进度较快,质量也易保证,因此目前应用最多。

## 2. 箱形框架结构形式简介

顶入法采用箱形结构的原因是:

- (1)箱形结构整体性好,刚度大,便于顶进施工;
- (2)变截面钢架结构跨中弯矩比简支梁小得多,因而顶板厚度可以做得较薄,建筑高度小;
- (3)基底应力小,易于适应地基较差的场合;
- (4)有利于防止地面水、地下水渗入桥孔;
- (5)抗震性能好。

箱形框架的横断面按使用要求可以分为单孔、双孔和三孔,个别情况还做成四孔。当用两孔或三孔框架断面时,根据施工现场设备能力,一般将两孔或三孔整体一次浇筑,一次顶进,这样整体性好,施工进度也快。也可将两孔或三孔分别浇筑,分别顶进。这时三孔可做成不同高度,有利于模板倒用,减少顶进阻力,线路加固也较容易(图5-3-19)。

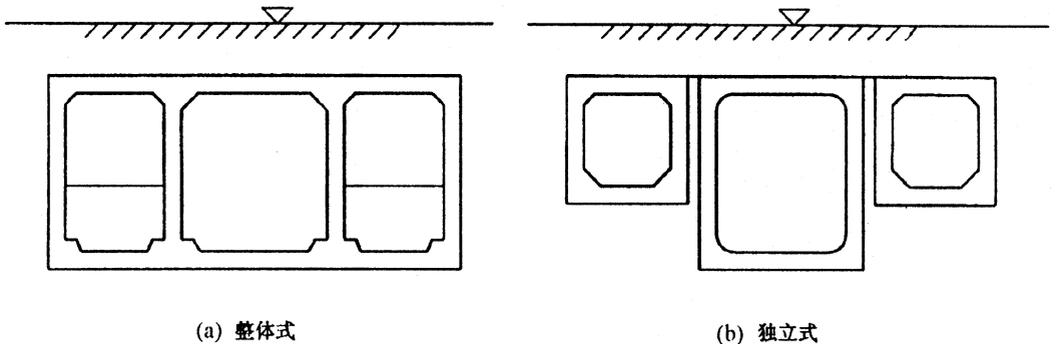


图 5-3-19 整体式和独立式框架结构

由于箱形框架采用整体底板,它与一般梁式体系相比,用料有所增加,因此在地基较好、地下水位较低,也可采用图 5-3-20 的分离式结构。它由一孔箱形框架和两孔筒支梁及桥台组合而成。框架、桥台和筒支梁可分别预制,分别顶入。其优点是用料省,挖土量少,进度也快。

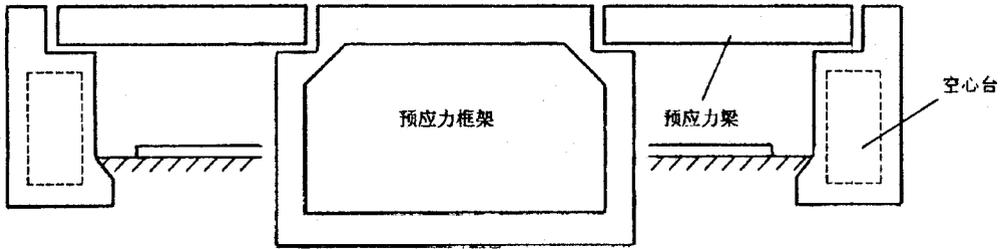


图 5-3-20 分离式结构

由于框架结构截面尺寸较薄,配筋较密,增加了箱体制作的难度,应注意加强钢筋及混凝土的施工质量。为提高抗裂性,减轻自重,便于顶进,对跨度大的箱涵应考虑采用预应力钢筋混凝土结构,这时更应重视质量。

### 3. 我国桥涵顶进施工发展概况

我国用顶进法修建桥涵仅有 30 余年历史,最早采用顶进法修建的北京永定门地道桥是 1965 年,由于它具有很多优点,并适合我国施工水平,受到铁路、公路、市政等有关部门的普遍欢迎,因而从 20 世纪 60 年代后期起,顶进桥涵施工出现了蓬勃发展的局面。首先是在大、中城市改建平交道口,逐步发展到集镇和铁路沿线的重要道口。座数愈来愈多,跨度逐渐增大,长度也逐渐增加。

20 世纪 60 年代北方城市中修建的天津东风地道桥(1966)、唐山永红地道桥(1967)都为桥涵顶进积累了经验。20 世纪 70 年代起顶桥规模有很大发展,北京地区又顶进一连串地道桥,其中包括当时我国跨度最大的西大望地道桥(8.15m—16.3m—8.15m, 1971)及广渠门(6m—14.5m—6m, 1971)、城子镇(6.8m—12.5m—6.8m, 1974)等地道桥。上海也建成军工路地道桥(4.5m—14m—4.5m, 1975)。石家庄市在这个时期也建成几座有代表性的地道桥,其中包括当时国内顶进最长的石家庄铁路枢纽上行编组场地道桥(两孔,顶进长度 116.5m, 1977),顶力最大的南马路地道桥(总重 10680 吨, 1978)。天津地铁是沿着墙子河故道用明挖法修建的,在过西门及穿越铁路西站时,为了不中断地面交通,也采用了顶进法修建。

20 世纪 80 年代修建规模进一步扩大,各大中城市大跨度地道桥日渐增多,如天津红

旗路(8m—16m—8m)、沈阳南八街(8m—16m—8m)、北京三环路纪家庙(9m—11.75m—11.75m—9m),还有呼和浩特呼伦路(8.15m—16.3m—8.15m)、石家庄和平路立交桥(斜向净跨15m—21m—15m,1986)等都是典型代表。进入90年代超大距离的框架桥修建成功,如北京丰台地道桥(14.9m—17.5m—17.5m—14.9m,1990)、石家庄二环路党家庄框架桥(斜向23.52m—23.52m,1994)等。

随着经济的发展,铁路和公路交通愈来愈繁忙,平交道口改立交道口的工程点以很大的速度在增长,特别是1997年4月起铁路运输全面施行提速后,平交道口改立交道口的工程点迅速增长。据有关部门规划,今后所有铁路干线的重要平交道口都要逐步改为立交道口,在若干年内,还有大量地道桥有待兴建。

箱涵顶进工艺不断地改进和完善。顶进箱涵的尺寸由小到大,孔数由单孔、双孔、三孔到四孔连续框架。由横向分解顶进、纵向分节顶进到四孔整体顶进。顶部覆土逐渐由厚到薄,甚至可以完全架空顶进。箱涵与铁路的交角由正交发展到斜交,顶进方法也由顶入法发展到对顶法、顶拉法、牵拉法、中继间法等等。

### 三、管涵顶进

随着国民经济的发展,城市建设和工矿企业中铺设各类地下管道的情况日益增多。如城市污水排水管道、雨水排水管道、给水工程中的自来水管、农田水利的引水渠道、煤气热力管网中套管、通讯电缆管的外套管等。特别是市政设施的改善常要在城市地下敷设许多新管道。上述各种管道如果都用开沟埋设,势必影响地面交通和城市生活。在穿越铁路、主要街道和地面建筑物下边敷设管道时挖沟法几乎是不可行的。顶进法则是适宜的方法,早在解放初期我国的一些大城市就已开始用顶进法埋设污水管道。顶进法的采用使得管路能按合理路线设置而又不影响或少影响城市生活,所以很受市政建设方面的欢迎。为推动顶管技术的发展,一些大城市的市政设计院还作出了钢筋混凝土圆管的标准图,一些单位还翻译出版或据我国经验编写了顶管技术专著。一些专业厂定点生产各种不同直径的钢筋混凝土管。北京市政设计院和北京铁路局联合设计的“铁路顶管通用图”1965年初即已使用,1980年底以后北京市政工程局对直径大于1000mm的顶管进行产品更新,更适用于铁路下顶进。北京局管内已施工的铁路顶管长达14km。1982年施工的北京南郊污水干线工程中,穿越铁路编组场时,一次顶进管道205m,管材质量完好。北京第三印染厂的污水排放工程,穿过一些街道、工厂和铁路,最后达通惠河,全长3.3km,埋深1.5m左右,分几段顶成。

目前铁路顶管专用管道的规格如表5-3-10。

表 5-3-10 铁路顶管专用管道规格

内径( mm )	1050	1150	1350	1550	1750	1950	2150
管壁厚( mm )	117	125	142	160	175	190	110
控制顶力( kN )	2600	3000	4000	5000	5900	6500	7700
最大顶力( kN )	4300	5000	6600	8200	10200	12000	14800

管顶覆土分 4m、8m、12m 三种。接头以企口为主(图 5-3-21)保留钢板内涨圈接口形式作为管道补强的一种措施。表 5-3-10 中控制顶力系企口式接头面上一个插口承压面所能承受的顶力,最大可能顶力系加垫平板式橡胶环以后,企口的插口和承口两个面都承压时的数值。

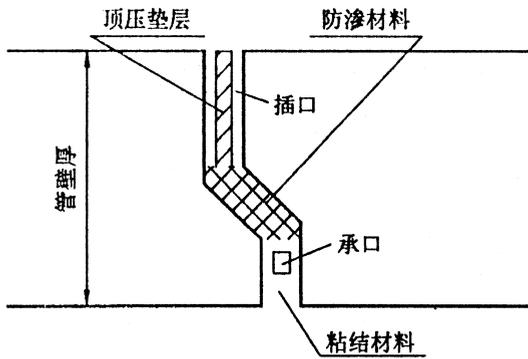


图 5-3-21 企口接头

顶管施工和箱涵顶进施工作业相同,只是由于顶管口径较小,顶程较长,管体一般都是工厂预制,故在设备布置上稍有不同。一般要求管顶覆土厚度不小于 2.0m。工作坑一般应有以下设备:导轨——保证顶进方向;后背——承受顶力;下管设备——卷扬机或吊链;顶进设备——包括油泵或摇镐机;出土设备——水平牵引及垂直牵引;照明设备——低压照明;通风设备——长距离顶进时需要;工作坑上工作平台。

管顶顶进各项作业中如何防止坍方和保证顶管的方向位置是两个中心环节。有的在首节前端部上半圆设钢板保护罩切土顶进,有的还事先加固上方土壤等。管节下部 135°范围不超挖,上部 255°范围超挖不得大于 15mm。顶镐着力中心位于管子总高的 1/4 左右;用一台顶镐时其平面位置应使顶镐中心与管道中心一致,多台顶镐时应与管线中心对称布置。

北京地区的抽样调查表明,1953 年最早顶进的涵洞至今运用情况良好。可以预料,今后利用顶进法修建的涵管还会大大增加。

## 四、小直径管道顶进

关于小口径管道与一般管道的区别,目前还没有一个统一的划分标准,一般指管径较小,人工无法进入或进入后很难进行操作的管道。这类管子最初用“硬顶法”直接将管子顶入地层,土体挤向四周,这种方法一般只用于管径在300mm以内的钢管、铸铁管的小距离顶进。20世纪20年代美国开发了水平钻机,先钻出孔眼,随即将管子敷设于孔内。到了70年代,小口径顶管技术发展速度,日趋完善,至今已有多项施工方法与设备。

目前利用振动、冲击或静压将土体挤向四周的贯入式有日本的铁鼠法、土箭法等。此法敷设的管径为250~900mm,顶进距离一般为50~80m。利用螺旋钻机将土切除运走,应用范围较广,效率也较高,管径为250~1000mm,顶管距离50~100m。水平钻机一般用于敷设钢管,顶距较短。盾构是专用设备,顶进距离可达150m,管径250~2000mm,但不能一机多用,费用较高。

小口径顶管技术发展的趋势是:设备小型化,提高设备的适应性、可靠性,设备的标准化、系列化,增长顶进距离等。

## 五、顶进技术的新发展

近几年顶进技术有了很快的发展,国内外在提高顶进精度,改善顶进条件并创造新顶进方法等方面都有不少成就和经验。

### 1. 路基钻孔

在用牵拉法或顶拉法施工时,都要在路基中钻出水平孔洞以穿孔钢缆。英国、美国、日本、荷兰、等国都生产这种钻孔所需的水平钻机(有的又叫挖洞机)。孔径有达到160mm的,日本有能钻300mm直径缆孔的水平钻机,孔长可达47.5m。

### 2. 方向控制

德国采用“挖向切削环”来导向。切削环上下左右安装四个螺杆来控制切进距离,能调整方向偏角 $5^{\circ}$ 。我国广州铁路局基建处采用激光导向纠偏,在箱涵后方装激光仪,箱涵前端装光靶,当箱涵偏位时,激光照到左右光电管上,通过硅三极管继电器发生动作,开动相应的纠偏千斤顶纠偏。当激光离开光电管,继电器复原,千斤顶正常工作。

### 3. 减少推顶阻力

这是目前很受重视的问题,特别是长距离大断面顶进,减少阻力意义更大。目前除了用得较多的钢刃角,中继间接力顶进外,向四壁压注膨润土泥浆可减少表面阻力50%,有的甚至只有一般顶力的 $1/4 \sim 1/6$ 。运用气垫技术减少摩擦,我国上海铁路局有较成功的经验,起动阻力可降低到0.289(一般为0.8),入土后最大顶力系数降到0.39~0.77

(一般为 1.2~1.4)。

#### 4. 立交桥的新施工方法

日本国铁近年来研究出一些修建立交桥的新施工方法,使得顶进法修立交桥技术有重大变革,在保证运营安全,提高工效等方面效果显著。这些方法中有 1977 年提出的 URT 法和 NNCB 法,1980 年提出的 PCR 法。这三种方法的原理相同,只是顶进充当横梁的构件不同。

PCR 法即预应力管棚法(Prestressed Concrete Roof beams)的简称。它是在既有线下路基中沿垂线路方向,利用水平钻机依次密排顶入预应力混凝土管棚构件。顶完顶部构件后再依次顶两边墙构件。然后在线路两侧工作坑内建造两端的钢筋混凝土 U 形端墙。利用端墙作支撑在其上建主梁。管棚构件的两端分别和端墙或主梁连起来,对管棚进行预应力施工时,将钢筋穿入管棚构件中,然后张拉钢筋并锚固在主梁和端墙上。上述工作完毕即可在管棚保护下全面开挖土体并修筑通道路面。此法的结构外貌及管棚构件断面见图 5-3-22。此法不必加固线路还可保证行车安全,也不需要大型顶进设备,结构的整体性也得到保证。

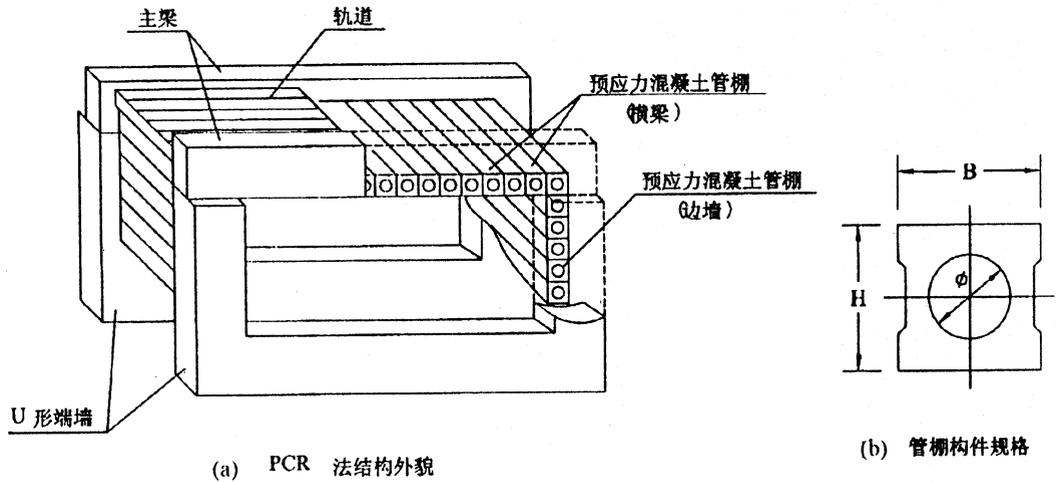
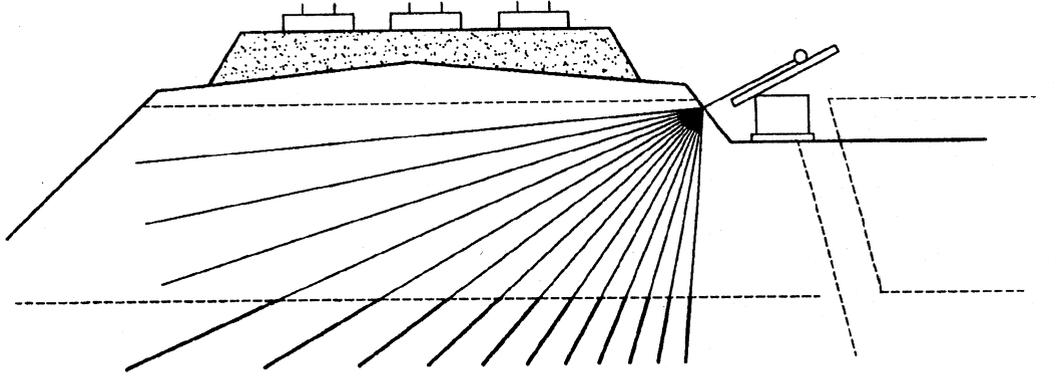


图 5-3-22 PCR 法

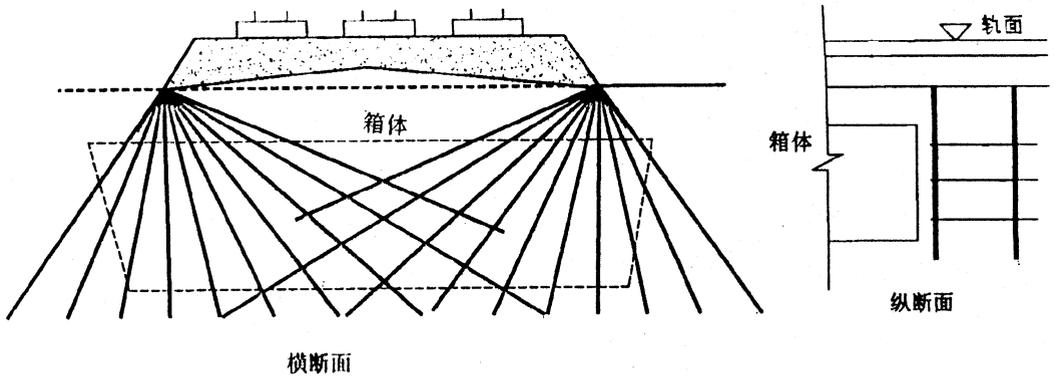
将上法的预应力混凝土矩形断面换成圆形钢管,即为 NNCB 法。在作端墙和主梁之前在钢管中插入圆形钢筋混凝土梁,并用砂浆填充空隙以增加管棚的强度和刚度。

高压旋喷注浆用于修建框架桥加固路基。在框架顶进中,软弱基底引起的“扎头”,正面坍塌使线路过度悬空,侧面坍塌引起路基横向开裂和下沉,都需要对路基进行加固。特别是繁忙和提速后的线路要求顶进施工时限速不低于 60km/h,对路基加固提出更高要求。由于地层条件的限制,静态注浆钻孔不易到达预定深度,或不能留住孔眼,或注浆范围难以控制时,用倾斜钻孔旋喷加固路基是提高限速条件下顶进施工中有效的安全措施(图 5-3-

- 23) 开挖工作面前方的土体由于若干固结体的存在,固结体周围土体又被挤压密实,土体综合力学指标大大提高,固结体又使滑动面抗滑能力加强,从而增加了土体的稳定性。在软弱基底,可加大此部分固结体直径,且向箱体方向倾斜,正好平衡箱体顶进时的推力和重力。因此基底承载力提高;“扎头”可能性减小。箱体两侧扇形固结体中可插入钢筋增加抗弯能力,再加上拉锚,相当于在箱体两侧形成挡墙,阻止路基土体内移动。



(a) 立交桥顶进中的加固



(b) 立交桥顶进中箱体两侧土体的加固

图 5-3-23 倾斜旋喷加固路基

## 第六节 装配式梁桥施工

### 一、概述

所谓装配式桥,一般将梁段横向分片或纵向分片在预制场预制,产品合格运到桥头,

安装就位。

装配式梁桥的施工包括分片或分段构件的预制、运输、安装三个阶段。桥梁的预制构件一般在预制场或预制厂内进行,再由运输工具运至桥位,横向分片预制件可采用吊机或架桥机架设,纵向分段在桥头串联张拉后,用吊机或架桥机架设。

### (一) 装配式梁桥的特点

采用预制安装法施工的装配式梁桥与就地浇筑的整体式梁桥相比较,有下列特点:

1. 加速施工进度。由于装配式梁桥的梁片预制可与桥梁下部结构同时实施,对加速施工进度,缩短施工工期,效果明显。

2. 节省支架、模板。装配式桥常采用无支架或少支架施工,预制场采用钢模板浇筑预制件,模板反复使用,达到节约木材的目的。高桥采用无支架安装可省去大量现场支架,节省工程投资。

3. 提高工程质量。装配式梁桥的预制梁片可以标准化,采取钢模板使梁体表面光洁美观,生产流程可以达到自动化,机械化、梁体混凝土计量自动化、振捣及养生均能达到理想要求,对梁体质量有较高保证率。

4. 需要吊装设备。预制梁片一般采用汽车吊、履带吊机、浮吊进行吊装架设,桥梁较长可采用架桥机架设。

5. 结构用钢量略为增大

装配式桥的造价与整体浇筑桥造价相比孰高孰低,不能一概而论,要对具体桥位进行分析。当桥址地形条件不可能设立支架,或者桥较高,支架施工时支架工程量大,施工单位有足够架梁设备时,采用装配式施工将是经济合理的。

近年来,随着吊运能力的不断提高,预应力工艺的渐趋完善,预制安装的施工方法在国内外得到迅速发展。据统计,在美国、前苏联和西欧各国,桥梁上部构造采用预制装配施工的已占 80%~90% 以上。我国公路、铁路、城市高架桥,已将中小跨径桥梁编制成定型化、标准化设计,使装配式施工得以广泛采用。

### (二) 预制构件的型式

装配式桥梁的设计时就应考虑将每孔桥梁分割成若干构件。预制构件型式随桥型不同而变化,一般可分为以下几种型式。

#### 1. 按桥横截面方向划分的构件和联结

按桥横截面方向划分构件的方法是板、梁桥常用的方法。装配式梁桥在横截面方向上由若干个构件组成,在桥的纵向则是整片的。这时构件之间需有纵向接缝。图 5-3-24 表示由一种预制空心板组成的桥梁上部结构和接缝形式。缝内用小石子混凝土填充,也可用横向伸出钢筋互相联结后,再填较内及铺装层混凝土来加强。

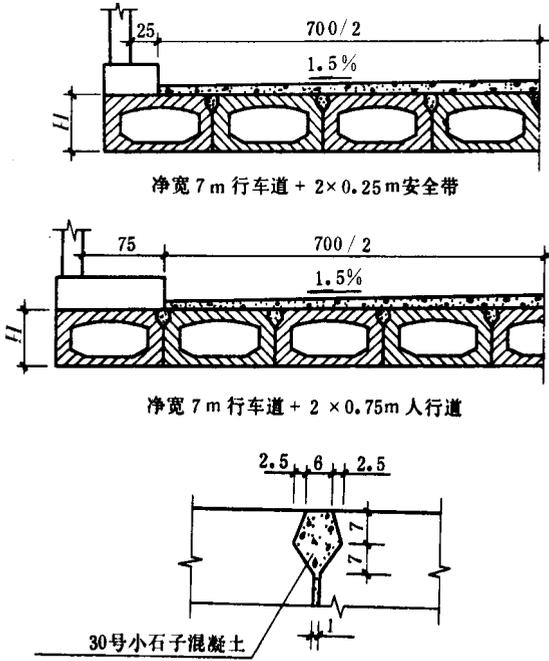


图 5-3-24 空心板梁的桥面结合截面

单位尺寸 :mm

无中间横隔板 T 型梁的横向连接,一般采用翼缘边之间的钢板焊接和桥面铺装层内的钢筋网来形成铰缝,如图 5-3-25 所示。具有中间隔板的 T 型梁桥,横隔板连接采用钢板焊接,并用水泥砂浆填嵌接缝,操作时需用专门吊篮,如图 5-3-26 所示。

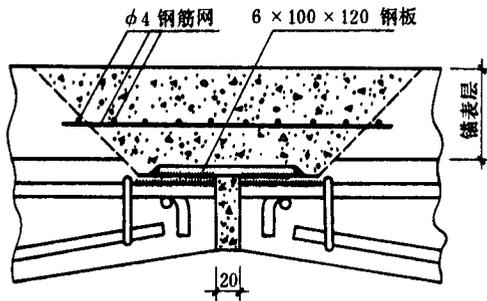


图 5-3-25 无中间横隔板的 T 梁的横向连接

单位尺寸 :mm

装配式箱梁桥的预制构件,按跨径和构件重量限制采用不同的划分方案。例如箱梁桥沿桥横向的分割可有如图 5-3-27 所示的几种情况。

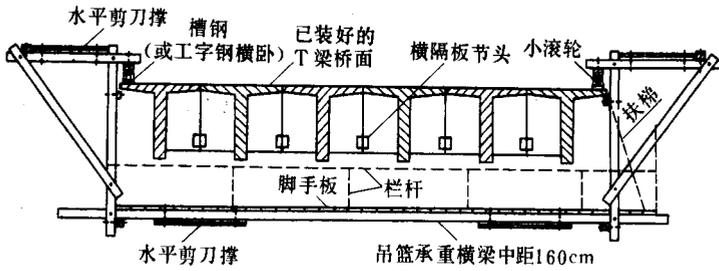


图 5-3-26 焊接横隔板时的活动吊篮

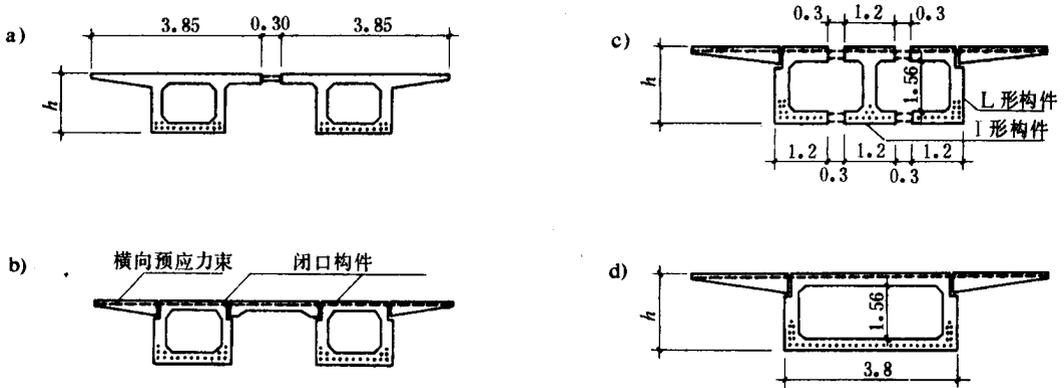


图 5-3-27 箱梁桥的构件断面划分方案

## 2. 按桥纵向分段的构件和接头

纵向分段是钢筋混凝土拱桥的主拱常采用的分段方法。为避免拱顶接头,分段为奇数,分段处设支架施工,既解决了拱肋分段过大受吊装能力限制,又可以保证施工期间通航要求。

梁桥沿桥纵向分段,1967年铁道部曾在成昆铁路海河大桥进行了试点。为了减少铺轨架梁的时间,改变预制梁体的长途运输状况,将标准跨度 23.8m 简支 T 形梁,分成 17 段预制块,每段重力 30kN 左右,由桥位附近的预制场用汽车将预制块运到桥头,梁分段间涂环氧树脂混合物(厚度 0.3mm 左右),再用钢丝绳将梁体串联起来,按设计要求进行张拉,采用 YC—60 双作用千斤顶及 JM12—SA 型锚具。这种型式的梁被称为串联梁。全线共生产 40 孔梁,串联梁采用装拆式架桥机架设,装拆式架桥机拆除后可用汽车运到另一工地。

### (三) 构件的接头形式

预制块件间的接头有三种方式:湿接头、干接头及干湿混合接头。湿接头就是现浇混凝土接头,必须在有支架情况下实施。干接头如钢板电焊接头,法兰螺栓接头、环氧树脂水泥胶涂缝的预应力接头等。干湿混合接头先由干接头受力,待现浇接头混凝土获得强度后共同受力。

1. 现浇混凝土接头(湿接头),见图 5-3-28 所示,构件的端头需有主筋伸出,互相焊接,并布置箍筋后浇筑混凝土。接头长度一般为 0.2~0.5m,接头混凝土标号一般采用比构件的混凝土标号高一级,或采用超早强混凝土,以达到尽快拆除支架的目的。

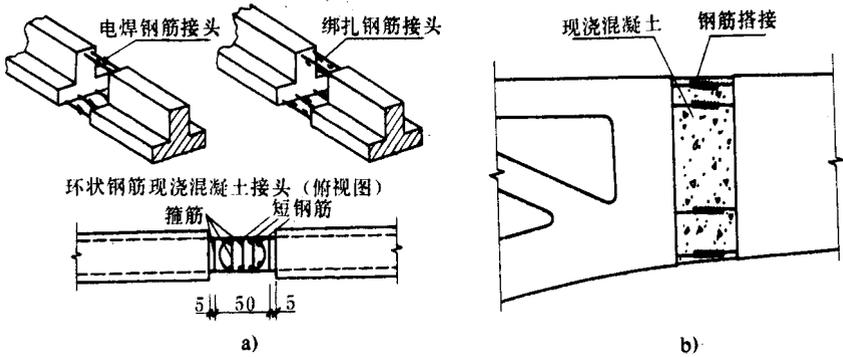


图 5-3-28 现浇混凝土接头

2. 钢板电焊接头,如图 5-3-29 所示,在构件接头端部预埋钢板,在构件就位后将钢板焊接起来。接头形式有如图所示三种形式:第一种采用在端面预埋钢板,接头时在钢板四周焊接。第二种采用在构件侧面预埋钢板与搭接钢板焊接。第三种在构件端部与侧面均预埋钢板,先焊接端部钢板,再加搭接钢板与侧面预埋钢板焊接。所有预埋钢板均要与锚固钢筋或与主筋相焊接。

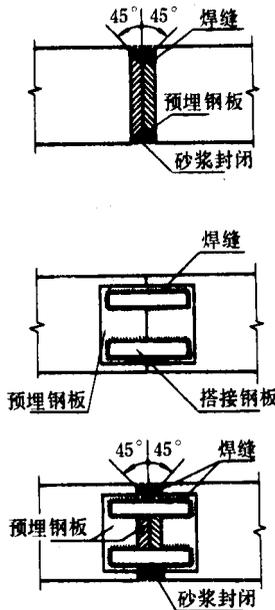


图 5-3-29 钢板电焊接头

3. 法兰螺栓接头,如图 5-3-30 所示,即在构件接头端预埋法兰盘,在构件就位后用螺栓将法兰连接起来。

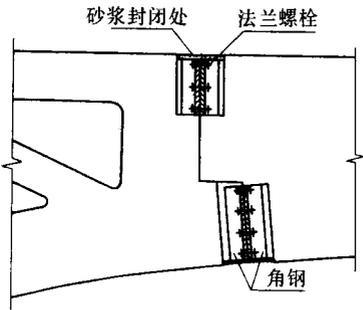


图 5-3-30 法兰螺栓接头

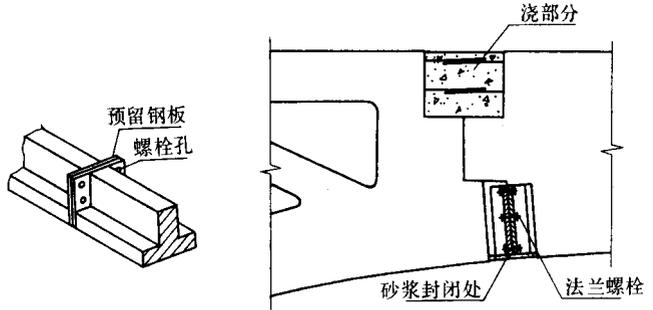


图 5-3-31 干湿混合接头

构件预制时,为了保证安装精度,应将两构件接头端法兰盘先用螺栓连好,再将法兰盘与主筋焊接,浇筑构件混凝土,这样,在构件安装连续时就容易对准就位。

4. 干湿混合接头,如图 5-3-31 所示,即在同一接头处既用现浇连接又用钢板电焊接头或法兰螺栓接头。

干湿混合接头,利用干接头部分尽快使构件拼接就位,现浇部分在拼接后再浇筑,这样使接头用钢量不致太多,又不影响施工的进展。

5. 预应力接头,如图 5-3-32 所示。当预应力混凝土箱梁或 T 梁由节段预制构件组成时,可利用结构所需要的预应力筋或预应力束串联成整体。拼接时在构件拼接端上涂环氧树脂水泥胶浆薄层,在胶浆硬化前拼接构件,使构件接头接触密贴,整体性好。

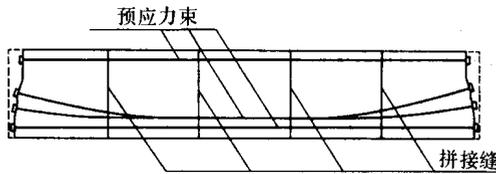


图 5-3-32 预应力接头示意

图 5-3-33 所示为英国伦敦西郊一座 16 孔变高度连续梁,施工时纵向分段预制构件用 4 根 16 股  $\phi 28.6\text{mm}$  钢索施加预应力而组成整体。构件最大重力为  $600\text{kN}$ ,最小重力为  $350\text{kN}$ 。

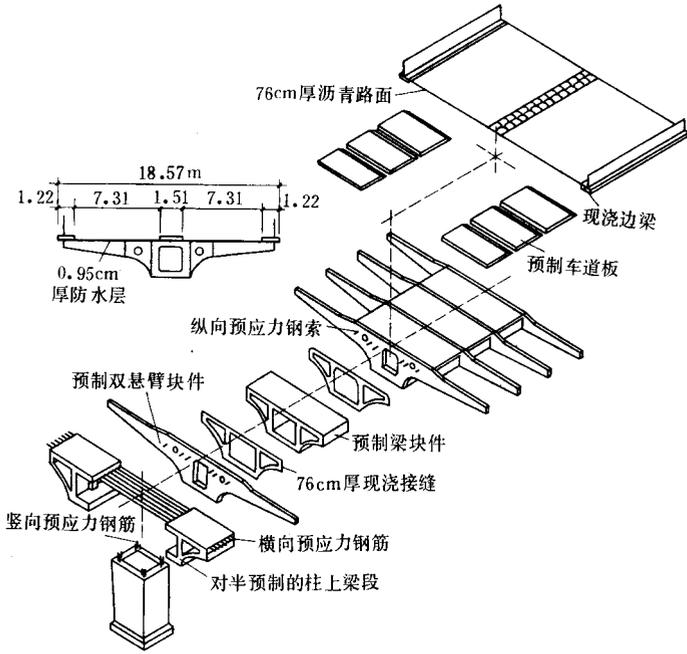


图 5-3-33 桥梁预制构件组合示意

## 二、装配式构件的预制工艺

### (一) 预制方法分类

#### 1. 立式预制与卧式预制

构件的预制方法按构件预制时所处的状态分立式预制和卧式预制两种。等高度的 T 梁和箱梁在预制时采用立式预制。这样构件在预制后即可直接运输和吊装,无需进行翻转作业。对于变高度的梁,宜采用卧式预制,这时可在预制平台上放样布置底模,侧模高度由梁宽度决定,便于绑扎钢筋和浇筑混凝土,构件尺寸和混凝土质量也易得到保证。卧制的构件需在预制后翻身竖起。一般构件在起吊之后进行翻身的操作。

卧式预制可分为单片预制和多片叠浇。单片预制就是在每一个构件预制的底座上先预制一片构件,待其出坑后再预制第二个同规格的构件。叠浇则是同一底座上预制数片,在前一片之上涂脱模剂后再浇筑后一片,以前一片作后一片的底模,如钢筋混凝土方桩的预制等。

#### 2. 固定式预制与活动台车预制

构件预制方法按作业线布置不同分固定式预制和活动台车上预制两种。固定式预制是构件在整个预制过程中一直在一个固定底座上,立模、扎筋、浇筑和养护混凝土等各个作业挨次在同一地点进行,直至构件最后制成被吊离底座(即所谓“出坑”)。一般规

模桥梁工程的构件预制大多采用此法。在活动台车上预制构件时,台车上具有活动模板(一般为钢模板),能快速地装拆,当台车沿着轨道从一个地点移动到另一个地点时,作业也就按顺序一个接一个地进行。预制场布置成一个流水作业线,构件分批地进入蒸养室进行养护。如果是后张式预应力构件,则从蒸养房出来后,即进入预应力张拉作业点。用这种方法预制构件,可采用强有力的底模振捣和快速有效的养护,使构件的预制质量和速度大为提高。这种方法适用于大批地或永久性地制造构件的预制工厂内采用。

### 3. 先张法与后张法

预应力构件按预制工艺不同分为先张法和后张法生产两种。先张法需张拉台座,所以一般在预制场进行,在台座上绑扎钢筋,布置预应力束(筋),并利用张拉台座张拉预应力并锚固,再浇筑梁体混凝土,待混凝土强度达到规定要求后在梁体外切割预应力束(筋)。后张法采用在浇筑梁体混凝土前,在梁体内按设计要求预留预应力束(筋)孔道,待梁体混凝土达到规定强度时,再在预留孔道内穿预应力束(筋),并进行张拉、锚固,最后在管道内进行压浆。所以后张法预应力构件可在现场进行制造。桥位现浇箱梁均采用后张法工艺。铁道部为了将梁体制造定型化、机械化,后张T型梁均在工厂预制,采用特种台车运输梁体。

#### (二) 预制基本作业

构件是在预制场(或厂)内预制的,预制场地和各种车间的布置必须合理。预制场(厂)内布置的原则是使各工序能密切配合,便于流水作业,缩短运输距离和占地面积尽量少。

下面介绍与构件预制有关的模板工作、钢筋工作和混凝土工作这几个基本作业的要点,然后再对预应力构件的制造工艺作专门的阐述。

#### 1. 模板工作

根据工程规模和预制工作量大小,模板可采用钢制、木制或钢木结合的。在较小的工程中,截面较小构件的制作,也可采用砖模或土木结合模。

制作T梁的模板,包括底模、侧模和端模。底模支承在底座上。底座有木底座和混凝土底座两种。制作空心板构件,尚需用芯模。制作箱梁节段,则另需内模。

#### 2. 钢筋工作

钢筋工作包括钢筋整直、切断、除锈、弯钩、焊接和绑扎成型等工作。工作的要求和内容与就地浇筑施工的钢筋混凝土桥梁基本相同。但对预制装配式桥梁来说,在构件预制时还需设置各种预埋件,包括构件的接缝和接头部位的预埋角钢、预埋钢板、预埋钢筋(伸出钢筋)等和吊点的吊环、预埋零件等。预埋件须与钢筋骨架牢固地连接。

#### 3. 混凝土工作

混凝土工作包括混凝土的拌制、运输、浇筑、振捣和养护等工序。要求和方法也与就地施工桥梁基本相同。然而由于预制场或预制工厂的设备和条件比现场为好,混凝土工作就有可能组织的更为合理有效,达到更高的质量要求。

### (三) 预应力构件的制造工艺

#### 1. 先张法预制工艺

先张法生产可采用台座法或流水机组法。采用台座法时,构件施工的各道工序全部在固定台座上进行。采用流水机组法时,构件在移动式的钢模中生产,钢模按流水方式通过张拉、浇筑、养护等各个固定机组完成每道工序。流水机组法可加快生产速度,但需要大量钢模和较高的机械化程度,且需配合蒸汽养护,因此适用于工厂内预制定型构件。

#### (1) 台座法预制

台座是先张法生产中的主要设备之一,要求有足够的强度和稳定性。台座按构造型式不同,可分为墩式和槽式两类。

##### ① 墩式台座

墩式台座是靠自重和土压力来平衡张拉力所产生的倾覆力矩,并靠土壤的反力和摩擦力抵抗水平位移。在地质条件良好、台座张拉线较长的情况下,采用墩式台座可节约大量混凝土。图 5-3-34 为具有钢丝束定位设备的台座。

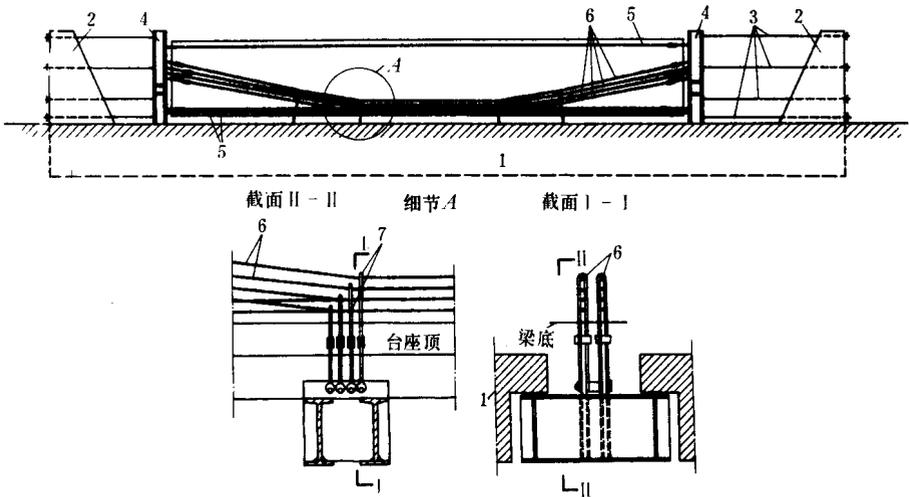


图 5-3-34 张拉折线形钢束的占座

1—台座 2—牛腿 3—钢拉杆 4—可动钢支架 5—直钢束 6—折线形钢束 7—定位器

##### ② 槽式台座

当现场地质条件较差、台座又不很长时,可采用槽式台座。槽式台座与墩式台座不同之处在于预应力筋张拉力是由承力框架承受而得到平衡。此承力框架可以是钢筋混

凝土的(图 5-3-35),或是由横梁和压杆组成的钢结构。

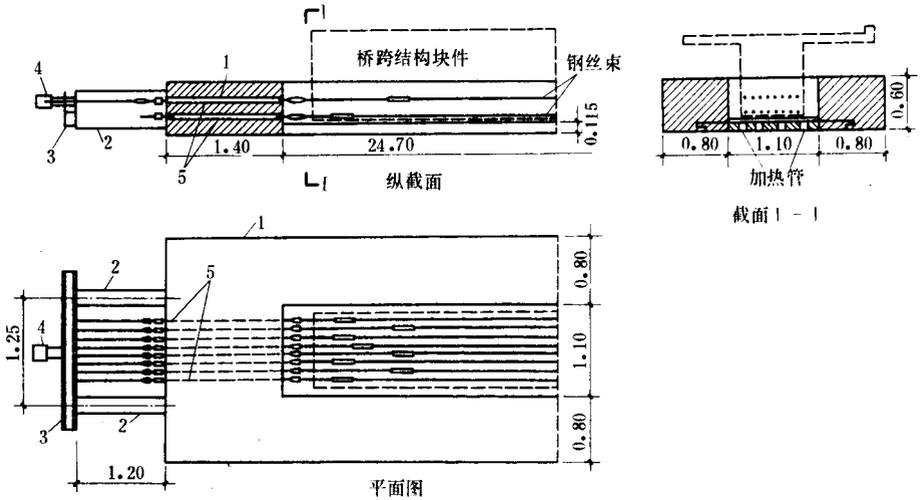


图 5-3-35 钢筋混凝土槽式台座 尺寸单位:m

1—承力框架 2—支柱 3—钢横梁 4—千斤顶 5—常备钢束

## (2) 预应力筋的制备

先张法预应力混凝土梁可用冷拉Ⅲ、Ⅳ级螺纹粗钢筋、高强钢丝、钢绞线和冷拔低碳钢丝作为预应力筋。粗钢筋(直径为 12~28mm)的制备工作,包括下料、对焊、冷拉、时效、墩粗和轧丝等工序。

冷拉就是对钢筋施加一个大于屈服强度而小于抗拉强度的拉力,使钢材屈服并产生塑性变形,从而提高钢材的屈服强度。

经过冷拉的钢筋余料,可在对焊后再次冷拉使用,但冷拉次数不得超过二次。同时在计算伸长值时,应扣除第一次冷拉的伸长值。

冷拉后的钢筋,若在一定的温度下给予适当时间的“休息”而不立即加载使用,那么由冷拉引起的钢材晶格的歪曲便可得到一定程度的恢复。这样就使钢筋的内应力得以消除,从而使钢筋的屈服强度、抗拉强度都比冷拉完成时更有所提高,并逐渐趋于稳定,钢筋冷拉时所降低的弹性模量也得到恢复,钢材的这种性质称为冷拉时效。

时效有自然时效和人工时效两种。将冷拉后的钢筋在自然温度下(25℃~30℃)放置一个较长的时间(20~30d)后使用,叫做自然时效。自然时效的效应较缓而费时较长,特别是有些钢种如 44Mn<sub>2</sub>Si 等,冷拉后在自然条件下其强度的提高和弹性模量的恢复更为缓慢。因此,在有条件的情况下,应尽可能地使用人工时效。

人工时效就是用加热的办法,使冷拉后的钢筋在 100℃的恒温下保持 2h 左右。经过人工时效的冷拉钢筋,其屈服强度可较时效前提高 10%~20% 以上,其弹性模量基本上

能恢复到冷拉前的数值。工程中常采用电热时效,即将冷拉后的钢筋通电加热,使温度维持在  $200^{\circ}\text{C} \sim 300^{\circ}\text{C}$  之间,经  $20 \sim 30\text{min}$  即达时效目的。

为了钢筋端的张拉和锚固,除了采用焊接螺丝端杆的方法外,也可采用墩头锚具或轧制螺纹锚具(或称轧丝锚具),以简化锚固方法和节约优质钢材。

### (3) 预应力筋的张拉和放松

先张法梁的预应力筋,是在底模整理好后在台座上进行张拉的。对于长线台座,预应力筋需要先用连接器串联后才能张拉。先张法梁通常采用一端张拉,另一端在张拉前要设置好固定装置或安放好预应力筋的放松装置。但也有采用两端张拉的方法。

先张法张拉钢筋,可以单根分别张拉或多根整批张拉。单根张拉设备比较简单,吨位要求小,但张拉速度慢。张拉的顺序应不致使台座承受过大的偏心力。多根同时张拉一般需有两个大吨位拉伸机,张拉速度快。

数根钢盘同时张拉时,必须使它们的初始长度一致,以便使每根钢筋张拉后的应力均匀。

预应力筋张拉的程序依预应力筋的类型而异。采用粗钢筋时的张拉程序为:

$0 \rightarrow \text{初应力(取张拉力的 } 10\% \text{)} \rightarrow (105\%) \sigma_k \xrightarrow{\text{持荷 } 5\text{min}} (90\%) \sigma_k \rightarrow \sigma_k \text{(锚固)}$

采用高强度钢丝时需要预拉,以减少预应力损失,张拉程序为:

$0 \rightarrow \text{初应力} \rightarrow 105\% \sigma_k \xrightarrow{\text{持荷 } 5\text{min}} \rightarrow 0 \sigma_k \text{(锚固)}$

采用钢绞线时,其张拉程序为:

$0 \rightarrow \text{初应力} \rightarrow 105\% \sigma_k \xrightarrow{\text{持荷 } 5\text{min}} \rightarrow 0 \sigma_k \text{(锚固)}$

$\sigma_k$  为张拉时的控制应力值,包括预应力损失值;初应力应采用同一数值,施工时采用油压表应力值与预应力束(筋)的延伸量量测,进行双控。交通部新规范中要求钢绞线也需张拉至  $105\% \sigma_k$  后回零再张拉至  $\sigma_k$  锚固,目前广泛采用于钢绞线的 OVM 锚具,一旦张拉至  $105\% \sigma_k$  后回油就自行锚固,所以施工中一般采用张拉至  $103\% \sigma_k$  锚固。

钢筋在超张拉时,其张拉值不得大于钢筋的屈服强度,或钢丝、钢绞线抗拉强度的  $75\%$ 。为施工安全,应在超张拉后放松至  $90\%$  的控制应力,进行安装预埋件、模板和钢筋等工作。

当混凝土强度达到设计要求后,可在台座上放松受拉预应力筋(称为“放张”),对预制梁施加预应力。当设计无规定时,一般应在混凝土强度大于设计标号的  $70\%$  时进行。放松之后,切割梁外钢筋,即可移位准备再生产。

放松预应力钢筋的办法有:用千斤顶先拉后松、砂箱放松、滑楔放松和螺杆放松等方法。

(4)流水机组法预制

所谓“流水机组法”是将若干个备有加力架的台车连在一起,顺生产线移动,在每一段上完成一道工序,最后一道工序完成后,台车转回至第一个位置,然后进行下一片梁的预制。

图 5-3-36 表示有两条生产线的工艺流程。在车间内有三条标准轨道,其中两边的两条为流水作业线,中间的一条为回车线。钢筋和钢丝的加工在车间的一端进行。

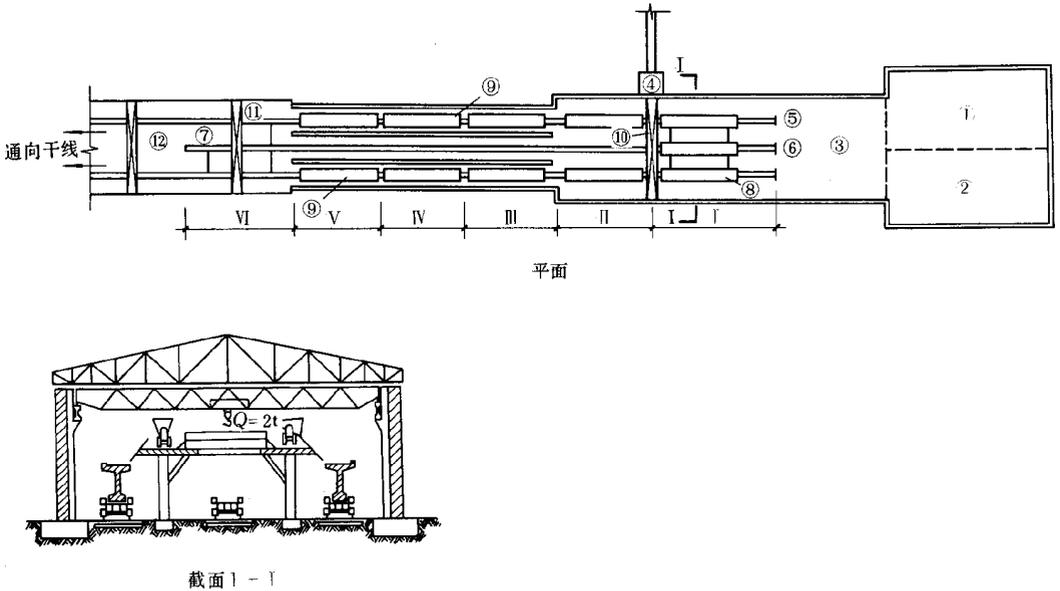


图 5-3-36 流水机组法的工艺流程

- 1—钢丝束制造工区 2—钢筋加工工区 3—预编钢筋骨架 4—混凝土搅拌工区；
- 5—流水工艺作业线 6—加工台车回转线 7—横移加力台车作业线 8—加力台车；
- 9—穿道式蒸汽养护室；10—天车；11—龙门吊车；12—成品存放场

每条流水线上划分为六个区段:在区段 I 进行加力台车的准备,张拉钢束,编扎钢筋,立模板;在区段 II 浇筑混凝土;在区段 III、IV、V 进行蒸汽养护;在区段 VI 进行拆模、截断钢束、吊梁、移梁及横移台车。台车在每一区段的作业时间约 16h,整个运行循环为 96h。

采用这种工艺,工作台座数量可降到最低限度,生产可集中在厂房内进行,不受季节影响,且工作集中,可以缩短材料及设备的运量和运距。

上述流水机组法制梁工艺所使用的加力台座的构造,只适于张拉下部预应力钢束。如果梁的上部布置有预应力钢束,则这部分仍须采用后张工艺,给工作带来不少麻烦。因此在国外应用流水机组法的制梁工艺中,也有使用如图 5-3-37 所示的加力架。加

力架的下部压杆是模板的一部分,上部压杆支于钢模板的支撑上,端部带一悬臂,以张拉上部钢丝束。为了简化悬臂的构造和改善其受力状况,在压杆中设一常备钢束拉住悬臂。加力架是分节装配式的,长度可以变更,以便制造跨度不同的桥跨结构。

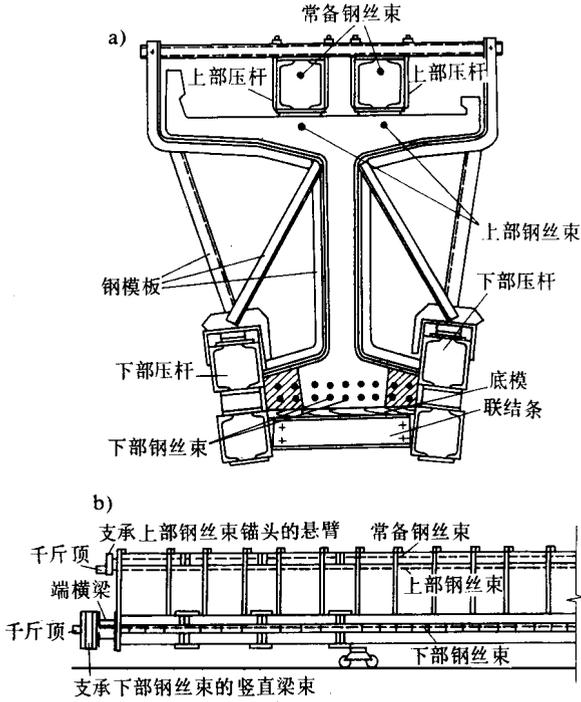


图 5-3-37 能同时张拉上下部钢束的加力架

a) 截面(台车未表示) b) 正面

使用流水机组法的制梁工艺,台车及加力架必须有足够的刚度,机组的走行路线必须平直,否则易使构件产生裂缝。

### (5) 先张法工艺流程举例

先张法预应力混凝土空心板梁预制的工艺流程见图 5-3-38 所示。

### 2. 后张法预制工艺

后张法工序较先张法复杂,需要预留孔道、穿筋、灌浆等工序,以及耗用大量的锚具和埋设件等,增加了用钢量和投资成本。但后张法不需要强大的张拉台座,便于在现场施工,而且又适宜于配置曲线形预应力束(筋)的大型和重型构件制作,因此目前在铁路、公路桥梁上得到广泛的应用。

后张法预应力混凝土桥梁常用高强碳素钢丝束、钢绞线和冷拉Ⅲ、Ⅳ级粗钢筋作为预应力筋。对于跨径较小的 T 梁桥,也可采用冷拔低碳钢丝作为预应力筋。

### (1) 高强钢丝束的制备

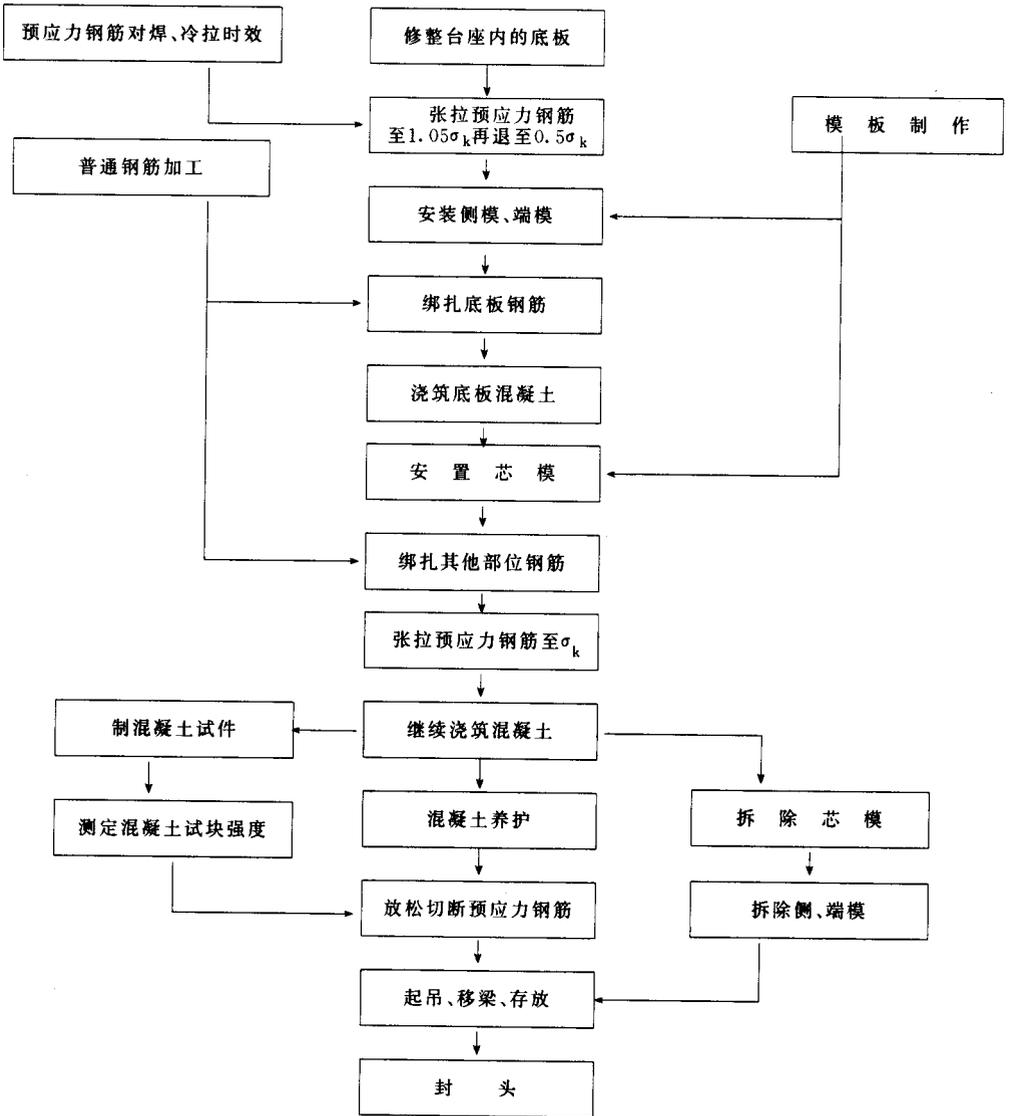


图 5-3-38 先张法预应力板梁预制工艺流程图

钢丝束的制作包括下料和编束工作。高强碳素钢丝都是盘圆,若盘径小于 1.5m,则下料前应先 在钢丝调直机上调直。对于在厂内先经矫直回火处理且盘径为 1.7m 的高强钢丝,则一般不必整直就可下料。如发现局部存在波弯现象,可先在木制台座上用木锤整直后下料。下料前除应抽样试验钢丝的力学性能外,还要测量钢丝的圆度,对于直径为 5mm 的钢丝,其正负容许偏差为 +0.8mm 和 -0.4mm。

① 钢丝调直 进行钢丝调直时,钢丝从盘架上引出,经过调直机,用绞车牵引前进。钢丝调直机开动旋转时,在其内通过的钢丝受到反复的超过其弹限的弯曲变形而被调直。

调直好了的钢丝最好让它成直线存放。如果需将钢丝盘直来存放时,其盘架的直径应不小于钢丝直径的 400 倍,否则钢丝将发生塑性变形而又弯曲。

② 钢丝下料 钢丝的下料长度应为

$$L = L_0 + L_1$$

式中  $L_0$ ——构件混凝土预留孔道长度;

$L_1$ ——固定端和张拉端(或两个张拉端)所需要的钢丝工作长度。

当构件的两端均采用锥形锚具、双作用或三作用千斤顶张拉钢丝时,钢丝工作长度一般可取 140~160mm。当采用其他类型锚具及张拉设备时,应根据实际需要计算钢丝的工作长度。

对于采用锥形螺杆锚具和墩头锚具的钢丝束,应保证每根钢丝下料长度相等,这就要求钢丝在控制应力状态下切断下料,控制应力为 300MPa。因此直径为 5mm 的钢丝都在 6.0kN 拉力下切断。

③ 编束 为了防止钢丝扭结,必须进行编束。编束时可将钢丝对齐后穿入特制的梳丝板,使排列整齐,然后一边梳理钢丝一边每隔 1~1.5m 衬以长 3~4cm 的螺旋衬圈或短钢管,并在设衬圈处用 2 号铁丝缠绕 20~30 道捆扎成束。这种制束工艺对防锈、压浆有利,但操作较麻烦。

另一种编束方式是每隔 1~1.5m 先用 18~20 号铅丝将钢丝编成帘子状,然后每隔 1.5m 设置一个螺旋衬圈并将编好的帘子绕衬圈围成圆束。

绑扎好的钢丝束,应挂牌标出其长度和设计编号,并按编号分批堆放,以防错乱。

当采用环销锚锚具时,钢丝宜先绑扎成小束而后绑扎成大束。绑束完毕后,在钢丝束的两端按分丝的要求,将钢丝束分成内外两层,并分别用铅丝编结成帘状或做出明显的标志,以防两端内外层钢丝交错张拉。

## (2) 钢绞线的制备

低松弛高强度预应力钢绞线的产生背景是由于桥梁跨度越来越大,为了适应预应力大吨位群锚的需要,和为节省钢材及投资。1986 年江西省新余市成立了中外合资企业“新华金属制品有限公司”,并于 1987 年从欧洲全套引进了低松弛预应力钢绞线生产设备、检测设备及工艺操作技术。1988 年中国第一条高强度低松弛预应力钢绞线生产线建成投产,经产品检测,质量全部达到美国 ASTM A416—87a 及英国 BS5896—1980 标准的最高级别要求。该厂生产的钢绞线已在开封黄河大桥、厦门高集跨海大桥、上海吴淞大桥等工程成功的使用。上海目前也能生产低松弛高强度预应力钢绞线。

低松弛是对普通松弛钢绞线而言。经在专门的松弛试验机上测定,在破坏荷载 70% 的荷载作用下,温度为  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ,1000h 后普通松弛钢绞线应力松弛值为 8%,而低松弛

钢绞线 $\leq 2.5\%$ 。

国产低松弛高强度预应力钢绞线原料采用上海宝钢生产的日本钢号 SWRH82b, 限制含碳量  $0.80\% \sim 0.85\%$ , 含锰量为  $0.60\% \sim 0.90\%$ , 磷硫含量分别不大于  $0.03\%$ 。并在钢中加入铬、钒、硅等合金元素, 以提高强度。

钢绞线从原料到成品生产工艺流程如下:

原料 $\rightarrow$ 原料检验 $\rightarrow$ 酸洗 $\rightarrow$ 涂润滑层 $\rightarrow$ 中和 $\rightarrow$ 烘干 $\rightarrow$ 拉丝打轴 $\rightarrow$ 半成品检验 $\rightarrow$ 绞线捻制 $\rightarrow$ 稳定化处理 $\rightarrow$ 重卷 $\rightarrow$ 成品检验 $\rightarrow$ 包装入库。

①酸洗 普遍采用硫酸和盐酸酸洗两种办法, 酸浓度控制在  $14\% \sim 20\%$  范围。新华金属制品有限公司采用先硫酸酸洗, 再采用盐酸酸洗的双酸酸洗方法。

②涂润滑层 采用先进的中温磷化工艺, 钢料盘条的磷化涂层具有良好润滑性能, 适宜于拉拔。

③拉丝 钢绞线的半成品钢丝都是经拉丝机八道连续冷拉而成, 通过加工硬化达到要求强度。

④打轴 经拉丝机后, 钢丝直接打轴收线在  $\phi 900\text{mm}$  工字轮中。

⑤绞线捻制 钢丝经绞线机绞成股线, 一组绞线由七根钢丝组成。

⑥稳定化处理 稳定化处理是实现低松弛、不松散的关键, 采用热机械处理, 是在  $350\text{C} \sim 400\text{C}$  温度范围, 同时给钢绞线施加张力, 使钢绞线内部应力得到消除, 结构紧密。稳定化处理将张拉与回火工艺合一, 应用于钢绞线连续生产中。

钢绞线运到现场后, 下料长度由孔道长度和工作长度决定。钢绞线切割宜采用机械切割法。

### (3) 孔道形成

后张法施工的预应力梁, 在浇筑梁体混凝土前, 需在预应力筋的设计位置预先安放制孔器, 以便梁体制成后在梁内形成孔道, 将预应力筋穿入孔道, 然后进行张拉和锚固。

孔道形成包括制孔器的选择、安装和抽拔以及通孔检查等工作。

①制孔器的种类 制孔器分为埋置式和抽拔式两类。埋置式制孔器主要有铁皮管和铝合金波纹管。埋置式制孔器在梁体制成后将留在梁内, 形成的孔道壁对预应力筋的摩阻力小, 但加工成本高, 使用后也不能回收, 金属材料耗用量大。铁皮管用薄铁皮制作, 安放时分段连接。这种制孔器制作时费人工, 速度慢, 在接缝和接头处容易漏浆, 造成以后穿束和张拉的困难。波纹管由铝合金片材用制管机卷制而成, 横向刚度大, 不易变形, 不会漏浆, 纵向也便于弯成各种线形, 与构件混凝土的粘结也较好, 故比较适用。

抽拔式制孔, 是利用制孔器预先安放在预应力束的设计位置上, 待混凝土终凝后将它拔出, 构件内即具有孔道。这种方法制孔的最大优点是制孔器能够周转使用, 省钢而

经济,应用较广。常用的抽拔式制孔器(俗称抽拔管)有以下三种:

a. 橡胶管制孔器 分夹布胶管和钢丝网胶管两种。通常选用具有5~7层夹布的高压输水(气)管作为制孔器,要求管壁牢固,耐磨性能好,能承受5kN以上的工作拉力,并且弹性恢复性能好,有良好的挠曲适应性。

预应力混凝土T梁的预留孔道长度一般在25m以上,而胶管的出厂长度却不到25m,并且考虑到制孔器安装和抽拔的方便,故常采用专门的接头。接头要牢固严密,防止灌筑混凝土时脱节或进浆堵塞。

胶管内如利用充气或充水来增加刚度,管内压力不得低于500kPa,充气(水)后胶管的外径应符合要求的孔道直径。

b. 金属伸缩管制孔管 它是一种用金属丝编织成的可伸缩网套,具有压缩时直径增大而拉伸时直径减小的特性。为了防止漏浆和增强刚度,网套内可衬以普通橡胶衬管和插入圆钢或 $\phi 5\text{mm}$ 钢丝束芯棒。

c. 钢管制孔器 它是用表面平整光滑的钢管焊接制成。焊接接头应磨平。钢管制孔器抽拔力大,但不能弯曲,仅适用于短而直的孔道。混凝土灌筑完毕后要定时转动钢管。

无论采用何种制孔器,都应按设计规定或施工需要预留排气排水和灌浆用的孔眼。

②制孔器的抽拔 制孔器可由人工逐根地或用机械(电动卷扬机或手摇绞车)分批地进行抽拔。抽拔时先抽芯棒,后拔胶管,先拔下层胶管,后拔上层胶管。

混凝土浇筑后合适的抽拔时间,是否能顺利抽拔和保证成孔质量的关键。如抽拔过早,混凝土容易塌陷而堵塞孔道;如抽拔过迟,则可能拔断胶管。因此,制孔器的抽拔要在混凝土初凝之后与终凝之前,待其抗压强度达4~8MPa时方为合宜。根据经验,制孔器的抽拔时间可参考表5-3-11或按下式估计:

$$t = \frac{100}{T}$$

式中  $t$ ——混凝土灌注完毕至抽拔制孔器的时间(h);

$T$ ——预制构件所处的环境温度。

由于确定抽拔时间的幅度较大,施工中也可通过试验来掌握其规律。

#### (4)穿钢丝束

当梁体混凝土的强度达到设计强度的70%以上时,才可进行穿束张拉。穿束前,可用空压机吹风等方法清理孔道内的污物和积水,以确保孔道畅通。穿束工作一般采用人工直接穿束,工地上也有借助一根 $\phi 5$ 长钢丝作为引线,用卷扬机牵引较长的束筋进行穿束。穿束时钢丝束从一端穿入孔道。钢丝束在孔道两头伸出的长度要大致相等。

表 5-3-11 制孔器抽拔时间表

环境温度(℃)	抽拔时间(h)
30 以上	3
30~20	3~5
20~10	5~8
10 以下	8~12

目前新的穿钢绞线束的方法是用专门的穿束机,将钢绞线从盘架上拉出后从孔道的一端快速地(速度为 $3\sim 5\text{m/s}$ )推送入孔道,当戴有护头的束前端穿出孔道另一端时按规定伸出长度截断(用电动切线轮),再将新的端头上护头穿第二根,直穿到达到一束规定的根数。

### (5) 预应力锚具

常用后张法预应力锚具有钢质锥形锚具、螺丝端杆锚具、JM12 型锚具、墩头锚具、星形锚具、群锚体系(OVM 锚具、YM 锚具)。

### (6) 锚垫板

锚垫板是后张法体系中的一个部件,其作用是将锚具传来的集中力分布到较大的混凝土承压面积上去。

为便于加工和安装,锚垫板一般为矩形。通常情况下,一块锚垫板上锚固一根钢绞线束。当预应力锚固束相距很近时,亦可将多根钢束锚固于同一块锚板上,如图 5-3-39。

锚固垫板的厚度应不小于 $12\text{mm}$ ,不宜太薄。太薄则受压后锚板将变形成锅底形,影响力扩散,使混凝土局部挤压剧增,可能发生混凝土劈裂事故。锚固垫板的后方,应进行局部加强。加强的办法是设置螺旋式钢筋或附加横向钢筋网,其构造如图 5-3-40。

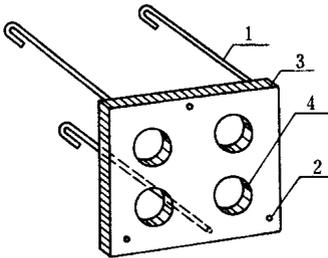


图 5-3-39 锚垫板图

1—锚固钢筋 2—半眼螺栓孔;  
3—锚垫板 4—孔道

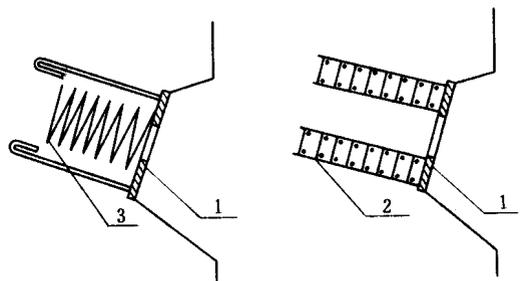


图 5-3-40 锚下防裂筋构造图

1—锚垫板 2—防爆式钢筋网 3—螺旋筋

施工时应严格控制使锚垫板与管道中心线垂直,否则,张拉时垫板将对混凝土产生侧向分力,也易使锚下混凝土劈裂。若发生锚垫板与管道中心线不垂直时,应衬垫楔形垫板校正(图 5-3-41)。

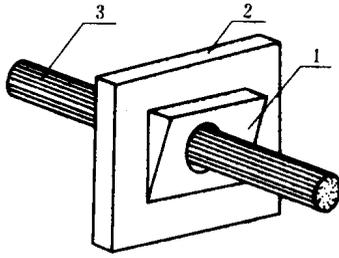


图 5-3-41 锚垫板上衬垫楔形垫板

1—楔形垫板 2—锚板 3—钢丝束

通常是将锚板浇筑在混凝土预制块件上。安装时事先将锚板用半眼螺丝固定在端头模板上,待混凝土浇筑完成后卸下与模板相连的螺丝,再脱去模板,此时锚垫板就固定在设计图所指定的位置。必须注意因锚板后方带有螺旋筋或防爆裂钢筋网,浇筑混凝土时必须对锚板后的部分进行充分捣固,以避免发生蜂窝。

安装锚板的第二种方法是将其安放在预制块件的表面上。采用这种方法时,应该在锚板与混凝土之间干填砂浆。砂浆强度应不小于支承面混凝土强度,接缝厚度应限制在 5cm 以内。也可以采用环氧粘剂将锚板贴在支承面混凝土上。

### (7) 张拉设备

张拉设备包括张拉千斤顶、高压油泵和压力表,现就后张法预应力工艺中较常采用的几种简介于下。

#### ① 张拉千斤顶。

a. GJZY—60(YC—60)型千斤顶 这是一种穿心式千斤顶,其张拉力为 600kN,适用于张拉粗钢筋或钢丝束。它的主要部分有:张拉缸、顶压缸、顶压活塞及弹簧等。GJZY—60 型千斤顶的特点是:沿拉伸机轴心有一穿心孔道,钢筋(或钢丝)穿入后由尾部的工具锚锚固。张拉前先装好工作锚和工具锚,然后打开后油嘴,使高压油由后油嘴进入张拉缸,这就迫使张拉缸缸体向后移动。由于钢丝束锚固在千斤顶尾部的工具锚上,因此,千斤顶通过工具锚将钢丝束张拉。当钢丝束张拉所需长度时,关闭后油嘴,从前油嘴进油至顶压缸内,使顶压活塞向前伸移而顶住锚塞,并将锚塞压入锚圈中,从而使钢丝束锚固。打开后油嘴并继续从前油嘴进油,这时张拉缸向前移动,缸内油液回程。最后打开前油嘴,使顶压缸内的油液回程,顶压活塞由于复位弹簧的作用而复还原位。其工作原理见图 5-3-42 所示,主要技术指标列于表 5-3-12。

b. YC—170 型三作用千斤顶 这是双作用千斤顶改进后的一种较适用的千斤顶。在构造上它比双作用千斤顶增加了一个退楔缸,同时由于在支承体上设置了一组与楔块对应的翼板,从而使张拉、顶锚、退楔三项工作能全部由千斤顶承担。

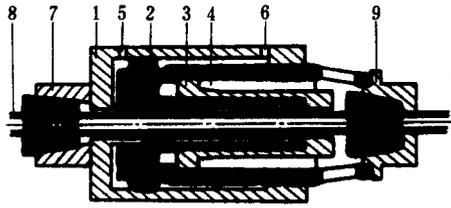


图 5-3-42 GJZY-60 型千斤顶

1—张拉缸 2—顶压缸 3—顶压活塞 4—弹簧 5—后油嘴 6—前油嘴 7—工具锚 8—钢丝 9—工作锚

表 5-3-12 拉伸机技术指标

型 号	张拉力 (kN)	顶压力 (kN)	张拉行程 (mm)	顶压行程 (mm)	工作油压 (MPa)	外形尺寸 (直径×长)	穿心孔径 (mm)	钳制钢丝数 (根)	生 产 厂
GJZY-60	600	350	200	50	32.0	φ220×500	55		柳州市建筑机械厂
YZ-170	635	330	180	60	28.0	φ360×875	24		西安筑路机械厂

三作用千斤顶适用于张拉用锥形锚具锚固的钢丝束。它主要由主缸套、主缸、小缸、退楔缸、大小活塞、弹簧、支承体、夹盘、退楔翼板及对正套等组成。夹盘设在大缸套外，上有槽沟而用楔块将钢丝楔紧于夹盘内，如图 5-3-43 所示。

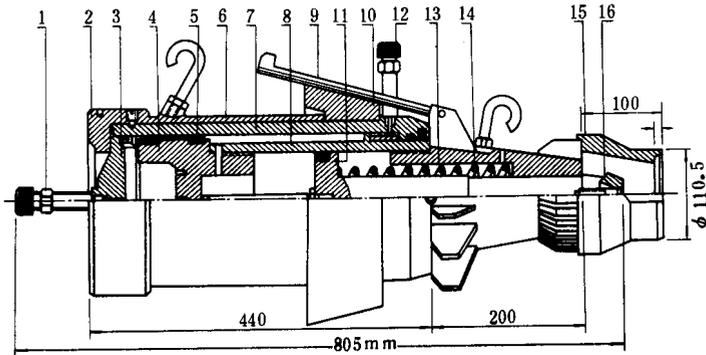


图 5-3-43 YC-170 型三作用千斤顶

1—后油嘴 2—主缸帽 3—主缸盖 4—活塞 5—主缸套 6—主缸；  
7—密封圈 8—小缸 9—楔块 10—夹盘 11—小活塞 12—前油嘴；  
13—支承体 14—弹簧 15—对正套 16—球座

与 YC-170 型构造相似的尚有 850kN 三作用千斤顶、600kN 双作用千斤顶。另有 YCD-120、YCD-200 型千斤顶，可用于锚固钢绞线束，也可锚固高强钢丝束。

② 高压油泵 高压油泵是为各种油压千斤顶及拉伸机供油用的，常用的有电动高压

油泵和手动高压油泵两种。电动高压油泵又有立式和卧式两种。油泵又分柱塞式和齿轮式。

③油压表 对预应力筋(束)施加预拉力的过程,也就是张拉千斤顶在高压油液作用下进行工作的过程,正确测量和掌握油压的大小,不但直接影响预应力构件的质量,而且对安全生产也影响极大。油压表的种类很多。在预应力施工中,为了保证油压表读数有足够的准确度,并确保使用安全与不易损坏,一般均选用精度不低于 1.5 级的弹簧管油压表。其表面的最大读数,应为实际使用读数的 1.5~2.0 倍。

### (8)张拉工艺

张拉前需做好千斤顶和压力表的校验,与张拉吨位相应的油压表读数和钢丝伸长量的计算、张拉顺序的确定和清孔、穿束等工作。应对千斤顶和油泵进行仔细检查,以保证各部分不漏油并能正常工作。应画出油压表读数和实际拉力的标定曲线,确定预应力筋(束)中应力值和油压表读数间的直接关系。

后张式构件,长度等于或大于 25m 时及曲线预应力束宜用两端同时张拉的工艺。只有短的构件可用单端张拉,非张拉端用死锚头。

张拉程序随预应力筋(束)各类和锚具型式不同而不同。张拉高强钢筋和钢绞线时一般采用:

0→初应力(画记号)→(105%) $\sigma_k$   $\xrightarrow{\text{持续 5min}}$   $\sigma_k$ (量伸长、施锚)

张拉钢丝束(用弗氏锚)时:

0→初应力(画记号)→(105%) $\sigma_k$   $\xrightarrow{\text{持续 5min}}$   $\sigma_k$ →顶塞(施锚)→大小油缸回零(量伸长和回缩量)→给油退楔

采用墩头锚时:

0→初应力(画记号)→(105%) $\sigma_k$ →0→ $\sigma_k$ (量伸长、施锚)

采用自锚式 OVM 锚具、YM 锚具时:

0→初应力(画记号)→ $\sigma_k$ (量伸长)→103% $\sigma_k$ (施锚)

各钢丝束的张拉顺序,应对称于构件截面的竖直轴线,同时考虑不使构件的上下缘混凝土应力超过容许值。

张拉时钢筋或钢丝应力用油压表读数来控制,同时量伸长量作校核。根据应力与伸长的比例关系,实测的伸长量与计算的伸长量相差不应大于 5%。

为使油压表读数正确反映千斤顶拉力,应规定千斤顶、油压表标定制度,例如千斤顶每月或张拉超过 100 次或多次出现断丝现象时要进行校验。换油压表后也要重新标定。

### (9)孔道压浆和封锚

压浆的目的是防护构件内的预应力筋(束)免于锈蚀,并使它们与构件相粘结而形成

整体。

压浆是用压浆机(拌和机加水泥浆)将水泥浆压入孔道,务使孔道从一端到另一端充满水泥浆,并且不使水泥浆在凝结前漏掉。为此需在两端锚头上或锚头附近的构件上设置连接带阀压浆嘴的接口和排气孔。

水泥浆内往往使用塑化剂(或掺铝粉),以增加水泥浆的流动性。使用铝粉能使水泥浆凝固时的膨胀稍大于体积收缩,因而使孔道能充分填满。

压浆前先压水冲洗孔道,然后从压浆嘴慢慢压入水泥浆,这时另一端的排气孔有空气排出,直至有水泥浆流出为止,关闭压浆和出浆口的阀门。

施锚后压浆前需将预应力筋(束)露于锚头外的部分(张拉时的工作长度)截除。压浆后将所有锚头用混凝土封闭,最后完成梁的预制工作。

现将后张法 T 梁构件预制的工艺流程表示如图 5-3-44 所示。

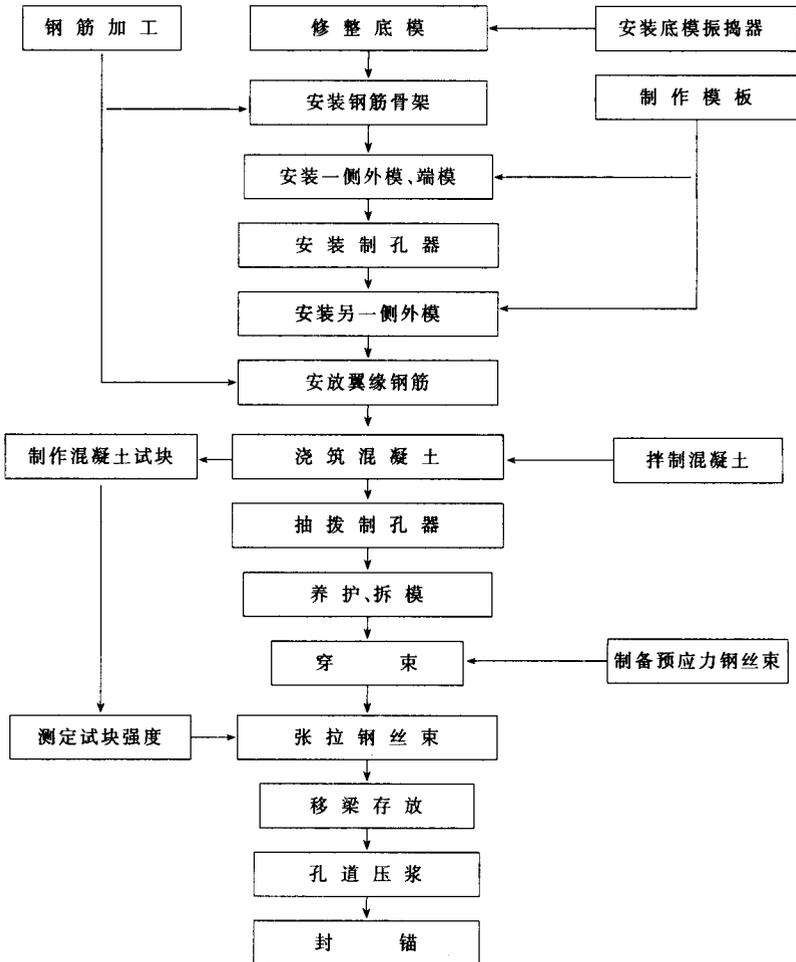


图 5-3-44 后张法 T 梁预制工艺流程图

### 三、装配式梁桥的安装

#### (一) 预制梁的出坑和运输

##### 1. 出坑

预制构件从预制场的底座上移出来 称为“出坑”。钢筋混凝土构件在混凝土强度达到设计强度 70% 以上, 预应力混凝土构件在预应力张拉以后才可出坑。

构件出坑方法, 一般采用龙门吊机将预制梁起吊出坑后移到存梁处或转运至现场, 如简易预制场无龙门吊机时, 可采用吊机起吊出坑, 也可用横向滚移出坑。

##### 2. 运输

预制梁从预制场至施工现场的运输称为场外运输, 常用大型平板车、驳船或火车运至桥位现场。

预制梁在施工现场内运输称为场内运输, 常用龙门轨道运输、平车轨道运输、平板汽车运输, 也可采用纵向滚移法运输。

#### (二) 预制梁的安装

在岸上或浅水区预制梁的安装可采用龙门吊机、汽车吊机及履带吊机安装; 水中梁跨常采用穿巷吊机安装、浮吊安装及架桥机安装等方法。

##### 1. 用跨墩龙门吊机安装

跨墩龙门吊机安装适用于岸上和浅水滩以及不通航浅水区域安装预制梁。

两台跨墩龙门吊机分别设于待安装孔的前、后墩位置, 预制梁由平车顺桥向运至安装孔的一侧, 移动跨墩龙门吊机上的吊梁平车, 对准梁的吊点放下吊架, 将梁吊起。当梁底超过桥墩顶面后, 停止提升, 用卷扬机牵引吊梁平车慢慢横移, 使梁对准桥墩上的支座, 然后落梁就位。接着准备架设下一根梁。

在水深不超过 5m、水流平缓、不通航的中小河流上的小桥孔, 也可采用跨墩龙门吊机架梁。这时必须在水上桥墩的两侧架设龙门吊机轨道便桥, 便桥基础可用木桩或钢筋混凝土桩。在水浅流缓而无冲刷的河上, 也可用木笼或草袋筑岛来作便桥的基础。便桥的梁可用贝雷组拼。

##### 2. 用穿巷吊机安装

穿巷吊机可支承在桥墩和已架设的桥面上, 不需要在岸滩或水中另搭脚手与铺设轨道, 因此, 它适用于在水深流急的大河上架设水上桥孔。

根据穿巷吊机的导梁主桁架间净距的大小, 可分为宽、窄两种。宽穿巷吊机可以进行边梁的吊起并横移就位, 窄穿巷吊机的导梁主桁净距小于两边 T 梁梁肋之间的距离, 因此, 边梁要先吊放在墩顶托板上, 然后再横移就位。

宽穿巷吊机见图 5-3-45 所示,宽穿巷吊机可以进行梁体的垂直提升、顺桥向移动、横桥向移动和吊机纵向移动等四种作业。吊机构造虽然较复杂,但工效却较高,且横移就位也较安全。

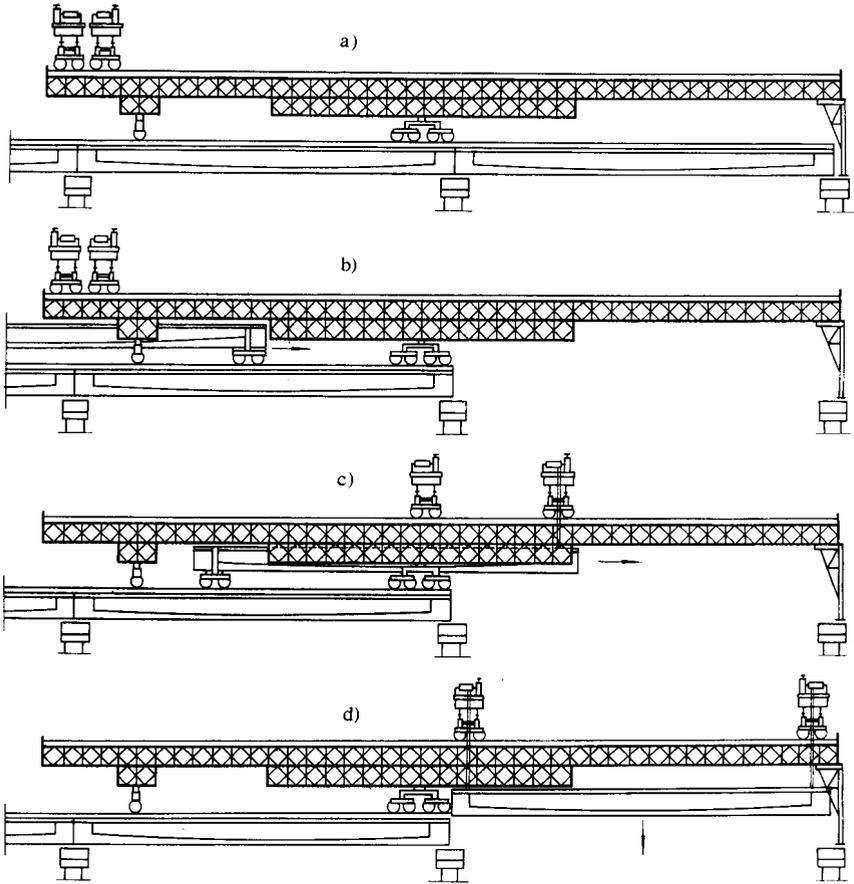


图 5-3-45 宽穿巷吊机架梁步骤

a)一孔架完后,前后横梁移至尾部作平衡重;b)穿巷吊机向前移动一孔位置,并使前支腿支承在墩顶上;c)吊机前横梁吊起 T 型梁,梁的后端仍放在运梁平车上,继续前移;d)吊机后横梁也吊起 T 型梁,缓慢前移,对准纵向梁位后,先固定前后横梁,再用横梁上的吊梁小车横移落梁就位

### 3. 自行式吊车安装

陆地桥梁、城市高架桥预制梁安装常采用自行吊车安装。一般先将梁运到桥位处,采用一台或两台自行式汽车吊机或履带吊机直接将梁片吊起就位,方法便捷,履带吊机的最大起吊能力达 3MN。

### 4. 浮吊安装

预制梁由码头或预制厂直接由运梁驳船运到桥位,浮吊船宜逆流而上,先远后近安装。浮吊船吊装前应下锚定位,航道要临时封锁。

采用浮吊安装预制梁,施工速度快,高空作业较少,是航运河道上架梁常用的办法。广东省在使用浮吊安装时,其最大起重能力达 5MN。

### 5. 架桥机安装

架桥机架设桥梁一般在长大河道上采用,公路上采用贝雷梁构件拼装架桥机,铁路上采用 800kN、1300kN、1600kN 架桥机。50 年代采用悬臂式架桥机,需设桥头岔线,桥头路基压道要求较高,危险性较大。60 年代开始试制单梁式架桥机及双梁式架桥机,既可使架梁作业比较安全,而且可不设桥头岔线,解决了山区桥头地形狭窄,架梁困难的难题。公路斜拉式双导梁架桥机,50/150 型可架设跨径 50mT 梁,40/100 型架设 40mT 梁,XMQ 型架桥机可架设 30mT 梁,BX—25 型号为贝雷轻型架桥机。目前国内架桥机最大起吊能力 3MN。

## 第七节 悬索桥施工

悬索桥施工主要有:锚碇、塔、主缆和加劲梁的制作和安装。其中尤以主缆及其附件的制造安装具有特色。

### 一、锚碇与塔的施工

#### (一) 锚碇

锚碇是主缆锚固装置的总称,由混凝土锚块(含钢筋)及支架、锚杆、鞍座(散索鞍)等组成。主缆由空中成束的形式进入锚碇,要经过一系列转向、展开、锚固的构件,本节只介绍锚块及其基础。

锚块的形式可分为重力式(图 5-3-46a)和隧道式(图 5-3-46b)。若锚碇处有坚实岩层靠近地表,修建隧道锚(或称岩洞式锚)有可能比较经济。美国华盛顿桥新泽西岸锚碇是隧道式,其混凝土用量  $22200\text{m}^3$ ,较之于纽约岸锚碇所用混凝土及花岗岩镶面工程量  $107000\text{m}^3$ ,仅为其 21%。但隧道锚有传力机理不明确的缺点。美国金门大桥原设计两端部都用隧道锚,但考虑到隧道锚块混凝土将力传给周围基岩机理不明确,总工程师乃改变决定,全部采用重力式锚碇。

有坚实基岩层靠近地表也可以采用重力式锚,让锚块嵌入基岩,使位于锚块前的基岩凭借承压来抵抗主缆的水平力。例如我国 1995 年建成的汕头海湾大桥,就是利用两岩山体岩层,设计为重力前锚式锚碇(锚块兜住石质山头,抵抗主缆拉力)。巨大的主缆

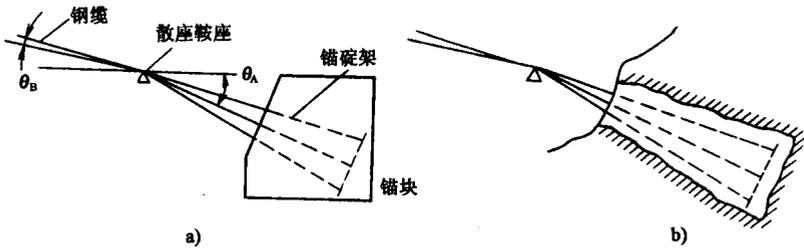


图 5-3-46 锚块

a)重力式 b)隧道式

拉力通过锚杆、后锚梁、锚块混凝土，均匀传递给基岩(图 5-3-47)。虎门大桥的东锚碇也为山后重力式锚。若坚实基岩位于桥面之下深度不过 30~50m，可修建直接坐落在基岩上的锚块。若坚实持力层埋深更大，而设计意图是使荷载完全传到该持力层，则必须设置沉井、沉箱大直径桩(含斜桩)等深基础。这样的锚碇造价当然是比较昂贵的。虎门大桥的西锚碇基础原设计为沉井加桩基方案，后经细探，发现基岩严重不平，沉井施工将会遇到很大困难，遂改为地下连续墙方案。如果将地基在荷载之下的各种变形予以充分考虑，也可以采用浅基础。

### (二)索塔

在 20 世纪 50 年代以前，大跨度悬索桥的索塔几乎都是采用钢塔，其主要优点是：施工速度快、质量容易保证、抗震性能好。直到 1958 年，法国建成主跨 608m 的其坦卡维尔悬索桥，方开始采用混凝土。我国新近建造的几座大跨度悬索桥(汕头海湾大桥、虎门大桥、西陵大桥、江阴大桥)全都是采用混凝土塔。塔的施工与斜拉桥塔基本上相同。

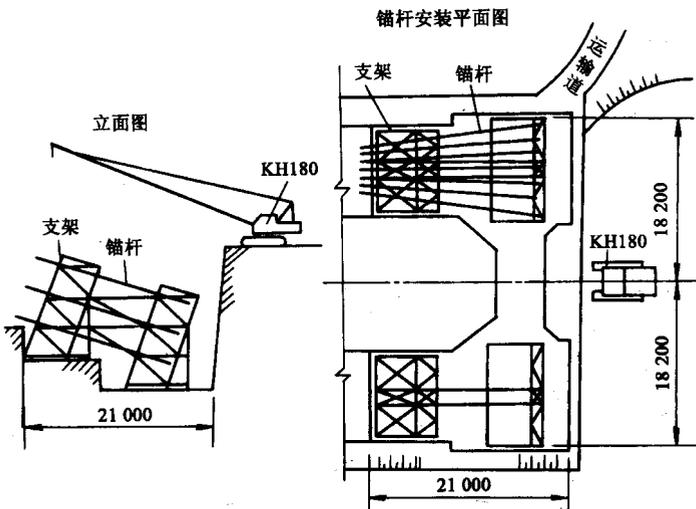


图 5-3-47 汕头海湾大桥锚碇(尺寸单位:mm)

## 二、主缆架设

悬索桥的钢缆有钢丝绳钢缆和平行线钢缆。前者一般用于中、小跨度的悬索桥,后者主要用于主跨为 500m 以上的大跨悬索桥。平行线钢根据架设方法分为空中送丝法(AS 法)及预制索股法(PWS 法)。

### (一)空中送丝法

用空中送丝法架设主缆,19 世纪中叶发明于美国,自 1855 年用于尼亚瓜拉瀑布桥以来,多数悬索桥都用这种方法来架设主缆。在桥西岸的搭和锚碇等都已安装就绪后,沿主缆设计位置,在两岸锚碇之间布置一无端牵引绳,亦即将牵引绳的端头连接起来,形成从这一岸到那岸的长绳圈。将送丝轮扣牢在这牵引绳上某处,且将缠满钢丝的卷筒放在一岸的锚碇旁,从卷筒中抽出钢丝头,暂时固定在某靴跟(可编号为 A)处,称这一钢丝头为“死头”。继续将钢丝向外抽,由死头、送丝轮和卷筒将正在输送的丝形成一个钢丝套圈,用动力机驱动牵引绳,于是送丝轮就带着钢丝送向对岸。在钢丝套圈送到对岸时,就用人工将套圈从送丝轮上取下,套到其对应的靴跟(可编号为 A')上。图 5-3-48 为送丝工艺意图。随着牵引绳的驱动,送丝轮又被带回这岸,取下套圈套在靴跟 A 上,然后又送向对岸。这样进行上百次,当其套在两岸对应靴跟(例如 A 及 A')上的丝数达到一股钢丝的设计数目时,就将钢丝“活头”剪断,并将该“活头”同上述暂时固定的“死头”用钢丝连接器连起来。这样,一根丝股的空中编制就完成了。

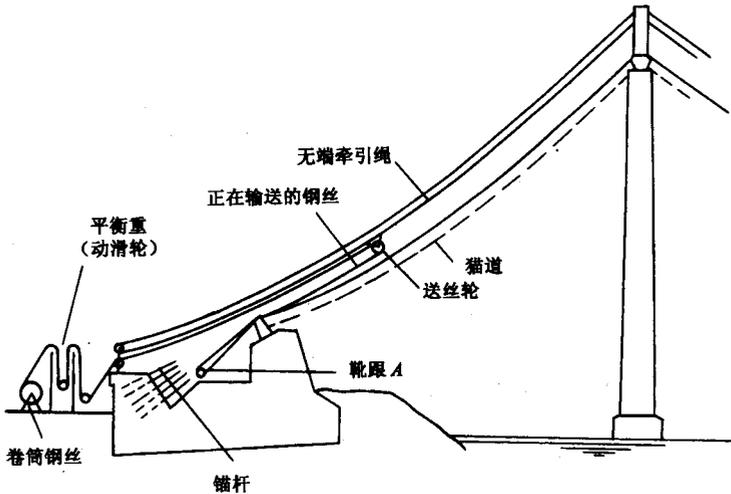


图 5-3-48 送丝工艺示意图

在上述基本原理基础上,可以采取多种提高工效的措施。如果对岸也有卷筒钢丝,可以利用刚才所说的送丝轮在其返程中另带一钢丝套圈到这岸来,从而在另一对编号为 B、B' 的靴跟之间进行编股。又,沿无端牵引绳可以设置两个送丝轮,两轮的间距为:当

甲轮从这岸驶向对岸时,乙轮正好从对风岸驶向这岸,而且两岸都有卷筒钢丝,于是就可以同时在  $C$ 、 $C'$  和  $D$ 、 $D'$  靴跟之间编制另两丝股。这就是“以四根丝股为一批”的安装。再者,对于送丝轮扣牢在牵引绳上的两个点而言,每点可以不只设一轮,例如美国金门桥是设四轮,而且每个送丝轮上的缠槽路也可以不只一条。

空中关丝法扩缆每一丝股内的钢丝根数约为 300 ~ 600 根,再将这种丝股配置成六角形或矩形并挤紧而成为圆形。它的施工必须设置脚手架(猫道),配备送丝设备,还需要有稳定送丝的配套措施。为使主缆各钢丝均匀受力,必须对钢丝长度和丝股长度分别进行调整,还应及时进行紧缆和缠缆。

## (二) 预制索股法

用预制索股法架设主缆是 1965 年间在美国发展起来的,其目的是使空中架线工作简化。自用于 1969 年建成的纽波特桥以后使用逐渐广泛,我国新近建成的汕头海湾大桥、虎门大桥、西陵大桥、江阴长江大桥都是采用这个方法。

预制股张束 61 丝、91 丝或 127 丝,再多就太重了。两端嵌固热铸锚头,在工厂预制,先配置成六角形,然后挤紧成圆形。架设的过程同空中送线法一样,但在猫道之上要设置导向滚轮以支持绳股。

虎门大桥每整 127 丝,每丝直径 5.2mm,每根主缆 110 束,采用站架式拽拉器牵引索股,如图 5-3-46 所示。在猫道上设置若干个猫道门架安装门架导轮组,牵引索通过这些导轮组,牵引索上固接有拽拉器,通过主(副)牵引卷扬机的收(放)索或放(收)索,使索引索带动拽拉器穿过导轮组作往复运动。索股前端与拽拉器相连,使得索股前端约 30m 长悬在空中运行,而索股后段则支承在导向滚轮上运。此方式也可用于空中送丝法。

## 三、加劲梁架设

架轻梁架设的主要工具是缆载起重机。架设顺序可以主跨跨中开始,向桥塔方向逐段吊装;也可以从桥塔开始,向主跨跨中及边跨岸边前进。

以往加劲梁多用钢桁架,其架设方式也像钢桁架桥那样,从桥塔开始向主跨跨中和岸边逐段吊装。在每一梁段拼好以后,立即将其与对应的吊索相连,使其自重由吊索传给主缆。对于三跨悬索桥而言,一般需要四台缆载起重机,分别从两塔各向两个方向前进。边跨和主跨的跨径比各桥不同,为了使塔顶纵向位移尽可能小,对于当主跨拼成多段时,边跨应拼几段,应该进行推算。在历史上,因为推算速度跟不上施工需要,曾使用全桥的结构模型试验(例如美国三藩市海湾桥)来决定较为合理的吊装次序。

从桥塔开始吊的优点是施工比较方便,缺点是桥塔两侧的索夹首先夹紧,此时主缆形状与最终几何线形差别最大,因而主缆中的次应力较大。汕头海湾大桥就是采用这种

方式,如图 5-3-49 所示。海湾大桥混凝土加劲箱梁主跨有 73 段,边跨各 24 段,首先将预制段从预场纵、横移下海,用铁驳浮运到主跨主缆下定位,用锚固在主缆索夹上的 800kN 缆载吊机垂直起吊安装。每安装一梁段之后,吊机向前移 6m,锚固到下一对索夹上,做下一梁段的吊装准备。吊装时,采用四点吊装法。

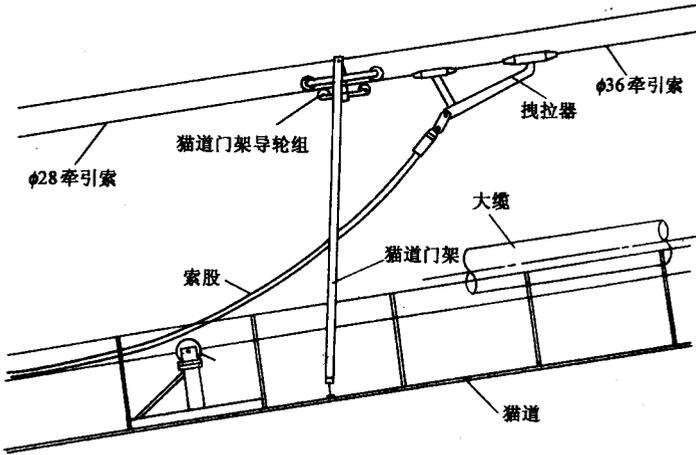


图 5-3-49 门架拽拉器牵引方式

当加劲梁的重力逐渐作用到主缆上,主缆将产生较大的位移,改变原来悬链线的形状,所以在吊装过程中缘一般都顶紧而下缘张开,直至全部吊装完毕下缘才闭合。如果强制使下缘过早闭合,结构或其连接件有可能因强度不够而破坏。合理的做法应该是:在架设的开始阶段,使各梁段在上缘铰接,而使下缘张开。这些上缘铰接的梁段应具备整体以横向抗弯抵抗横向风荷载的能力。待到一部分梁段业已到位,主缆线形也比较接近最终线形时,再将这一部分梁段下缘强制闭合,当然必须通过施工控制确认此时闭合是结构和其连接件都能够承受的。

英国 1966 年建成的塞文桥梁段吊装是从跨中开始,向桥塔方向前进。如果边跨较长,为避免塔顶产生过大的纵向位移,应从两岸向桥塔方向同时吊装边跨梁段,如图 5-3-50 所示。这种吊装次序的优点是:在架设桥塔附近的加劲梁段时,主缆线形已非常接近其最终何形状,此时将桥搭附近的索夹夹紧,主缆的永久性角位最小。虎门大桥(边跨无加劲梁)主跨 39 个梁段,其吊装次序就是先吊跨中段,再从跨中对称向两桥塔前进,直至全桥合龙。

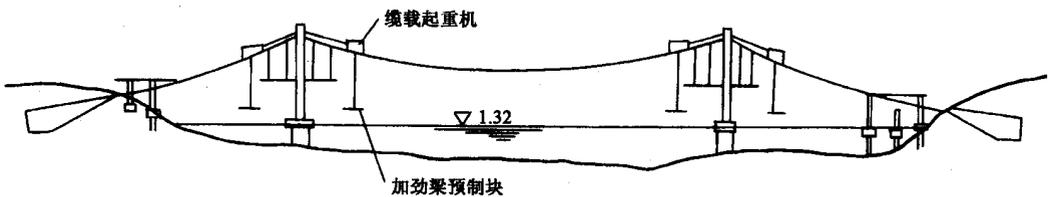


图 5-3-50 汕头海湾大桥吊装示意图

### 四、工程实例 汕头海湾大桥预应力混凝土加劲梁施工

#### (一)工程概况

本工程概况见表 5-3-13。

表 5-3-13

设计单位 :铁道部大桥局勘测设计院	桥梁所在地 :广东省汕头市
施工单位 :铁道部大桥局第三工程处	施工时间 :1992.3 ~ 1995
预应力施工单位 :铁道部大桥局第三工程处	桥梁用途 :汽车专用公路及城市双功能
结构类型 :现代悬索桥加劲梁	主跨组成 :154m + 452m + 154m
设计荷载 :6 车道汽车—超 20 级 ,挂车—120	混凝土强度等级 :C60
预应力部位 :加劲梁纵横双向	配筋方式 :体内、体外、直线、曲线
预应力筋 :7-7 $\Phi$ 5.9-7 $\Phi$ 5 钢绞线 H. D. P. E $\Phi$ 5 镀锌钢绞线 $\Phi$ 15 无粘连接钢绞线	锚具种类 :QM 锚
预应力张拉设备 :YCD—250 型 ,—25 型千斤顶	张拉方式 :两端
单位面积材料用量 :预应力筋 46.1kg/m <sup>2</sup> ,普通钢筋 :128.1kg/m <sup>2</sup> ,混凝土 0.51m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>	

桥梁特点 :本桥为三跨双铰式现代悬索桥。其跨度与规模之大均为当今世界上已成的同类型桥梁之冠。加劲梁的中孔跨度 444m ,边孔跨度 150m。梁的横载面为单箱室的薄壁混凝土结构 ,倒机翼形外轮廓 ,空气动力特性十分良好。配用体内、体外、无粘结等三种不同类型的预应力钢丝束。其中 ,体外束用 7- $\Phi$ 5 镀锌钢绞线外包 (单根) H. D. P. E 护套 ,系国内有大桥上首次采用。

#### (二)结构设计

本桥以主缆为承重的主体 ,加劲梁由间距 6m 的吊杆悬挂在主缆上。梁结构只起分布车辆等活载的作用 ,因为主缆受载后的非线性变形而被迫弯曲。在梁的两端只设限竖向位移的支座 ,成桥后给梁以纵向水平约束 ,形成半飘浮的结构体系。在平面内 ,三孔梁之间用水平桁架连接成半连续体系 ,将梁所承受的侧向风力通过水平桁架设在塔柱内壁的支承受传递到主塔 (图 5-3-51)。

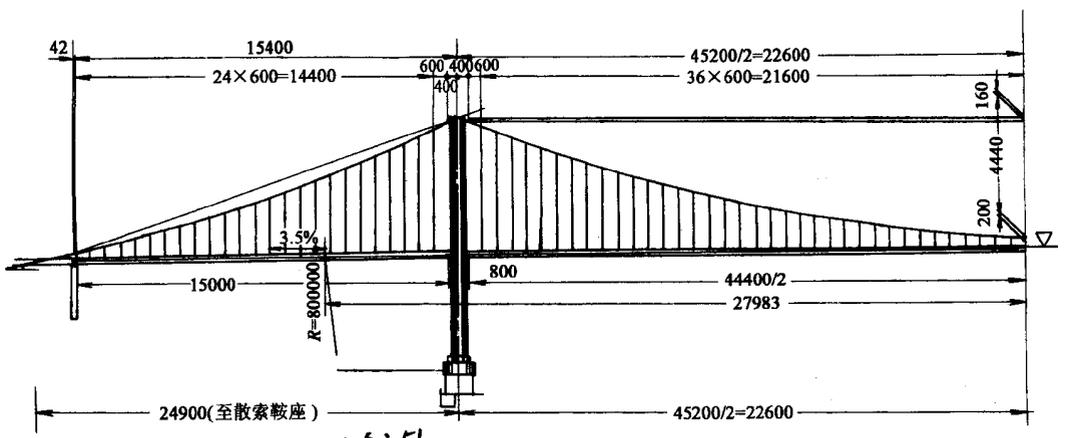


图 5-3-51 悬索桥 1/2 立面图(尺寸单位 :cm)

梁的横截面呈流线形,为薄壁单箱三室构造。顶板厚 18cm,为 2% 的坡面。底板厚 14cm,为半径 76.88mm 的圆弧。中腹板厚亦为 18cm,边腹板为变厚度的梯形。梁的中心高度 2.2m,水平投影宽度 24.72m。在梁的吊点处设实腹板主横梁,向外伸出吊耳。在两吊点之间设加劲圈式的副横梁,将顶板分隔成 3m 的纵向跨度。

梁体采用全截面纵向分段预制的施工方案,段长 5.7m,以主横梁为轴线对称分割,每段的吊装质量 172t。副横梁处在 0.3m 宽度的工地湿接头位置,上桥后与接头混凝土一并浇制。这一构造性的安排,既有利于改善局部结构的受力,又确保了截面薄板相互对接的可靠性(图 5-3-52)。

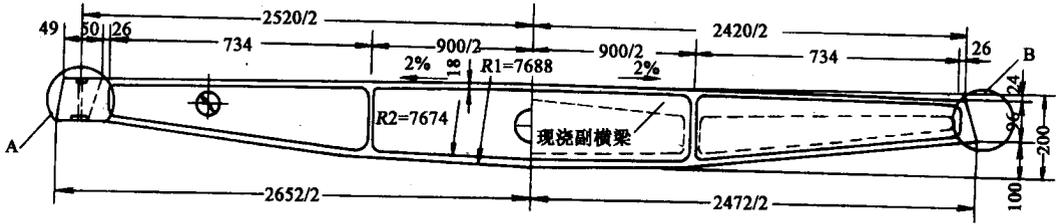


图 5-3-52 主梁截面图(尺寸单位:cm)

### (三) 施工

#### 1. 预制

箱梁预制段形状特别,且为薄壁,为保证形状的线型流畅,模板及胎架设计很关键。

#### (1) 模板和模板胎架设计

箱梁能成橄榄形,全靠模板线型和刚度及模板胎架稳固调节,汕头桥箱模板全为钢模,胎架由型钢制成,而且每一支点均可调节,设计时除满足强度和刚度外,还采取了:

①在方便装拆的前提下,尽量加大模板的分块,减少拼缝,保证线型。

②保证箱梁横向预应力张拉时,箱梁自重参加作用,除底模设计成随胎架升降外,在箱梁两端还配有起顶千斤顶。

③为保证箱梁自重精度在  $\pm 2t$  范围内,顶板和底板腹腔内还设置了混凝土配料精度和混凝土限厚装置。

④底模、肋模均设置了附着式振动器,操作时,分区振动,保证混凝土密实。

#### (2) 混凝土浇注

汕头海湾大桥主箱梁是一个钢筋多,孔道密集,预埋件精度要求高的薄壁混凝土结构,混凝土强度 C60,用 52.5 级普通硅酸盐水泥。掺用湛江 FDN-3000 型减水剂。混凝土配料精度:水和水泥  $\pm 1\%$ ,骨料  $\pm 2\%$ ,每片梁段一次浇筑完成。

混凝土浇注原则:先底板及中肋根部,其次灌注箱梁主横肋腹板、中肋腹板、端腹板,

最后浇注顶板。

顶板预应力束孔道采用胶管抽拔成孔,底板体外索孔道则用预埋器氟管留孔。

## 2. 吊装(图 5-3-53)

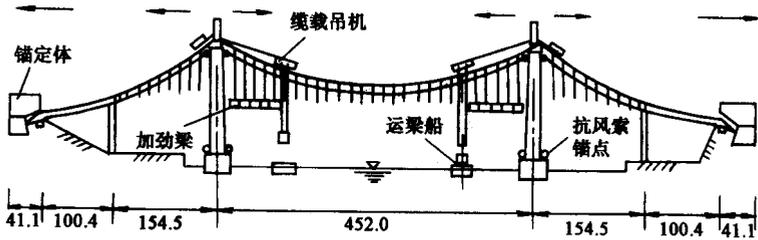


图 5-3-53 吊装(尺寸单位:m)

每段箱梁在吊装之前,先在预制场预拼台座上进行逐一预拼。预拼主要解决采用短线法制梁所带来的互相匹配中的问题:预埋件误差;预埋孔道误差;钢筋碍事;梁段间连接件的放样、制造。即将高空中可能产生的问题,先在预制场解决。

吊装时,每段箱梁通下海重型码头装船,运至安装点,利用 1800kN 缆载吊机提升安装。梁段间彼此通过临进连接件连为一体。待 121 片梁段安装完毕后,灌注湿接头副横梁,穿纵向索(粘结束和体外索)张拉,形成三孔完整的桥梁。

吊装的顺序:以两具主塔为轴。对称地向岸侧、向中跨中心进行。

## 第四章 桥梁工程质量检验评定

### 第一节 概 述

桥梁在施工过程与施工完毕后均要进行质量评定。首先是施工过程中对分项工程、分部工程的质量评定,其次是施工完毕后进行单位工程质量评定。

#### 一、单位、分部、分项工程划分

根据建设任务、施工管理和质量评定需要,桥梁建设项目应按下列原则和表 5-4-1 划分单位工程、分部工程和分项工程。

##### (一)单位工程

在桥梁建设项目中,根据业主下达的任务和签订的合同,具有独立施工条件,可以单独作为成本计算对算的工程。

##### (二)分部工程

在单位工程中,应按结构部位、施工特点或施工任务划分若干个分部工程。

##### (三)分项工程

在分部工程中,应按不同的施工方法、材料、工序等划分为若干分项工程。

施工单位应按此种工程划分进行质量自检和资料汇总,质量监督部门按照此种工程划分逐级进行工程质量等级评定。

表 5-4-1 单位、分部及分项工程的划分

单位工程	分部工程	分项工程	
桥梁工程 (大、中桥) (每座为单元)	小桥★(每座为单元)	基础及下部构造★,上部构造预制、安装或浇筑★,桥面★,栏杆,人行道等	
	基础及下部构造★	明挖基础,桩基★,管柱,承台,沉井★,桩的制作★,钢筋加工安装,柱及双壁墩★,墩台身,墩台安装,墩台帽★,组合桥台★,锥坡等	
	上部构造 (每从桥汇总)	预制,安装★	主要构件预制★,其他构件预制,钢筋加工及安装,预应力筋的加工和张拉★,斜拉索的制作与防护★,梁、板安装,悬臂拼装★,顶推施工梁★,拱圈安装,转体施工★,钢管拱的制作与安装★,半刚性骨架拱肋的制作与安装★,吊杆的制作与安装★,钢梁安装及防护★等
		现场浇筑★	钢筋加工及安装,预应力筋的加工和张拉★,主要构件浇筑★,其他构件浇筑,悬臂浇筑★,钢管拱浇筑★,半刚性骨架混凝土拱浇筑★,索塔★等
		总体及桥面	桥梁总体★,桥面铺装★,栏杆,护栏安装,人行道铺设,灯柱安装等
防护工程		护坡,护岸★,导流工程★,石笼防护,砌石工程等	
互通立交工程 (每座为单元)	桥梁工程★(每座为单元)	基础及下部构造★,上部构造预制,安装或浇筑★,桥面★,栏杆或护栏,人行道等	

注 ①表内标注★号者为主要工程,评分时给以 2 的权值

②特大桥可每座作为一个建设项目

## 二、工程质量检测内容

### (一)水泥混凝土强度合格标准

(1)桥梁工程所检验的混凝土抗压试块,当试块 $\geq 10$ 组时,应以数量统计方法按下述条件评定:

$$\bar{R} - K_1 S_n \geq 0.9R \quad (5-4-1)$$

$$R_{\min} \geq K_2 R \quad (5-4-2)$$

式中  $n$ ——同批混凝土试块组数;

$\bar{R}_n$ ——同批  $n$  组试块强度的标准差(MPa),当  $S_n < 0.06R$  时,取  $S_n = 0.06R$ ;

$R$ ——混凝土设计强度(MPa);

$R_{\min}$ —— $n$  组试块中强度最低一组的值(MPa);

$K_1$ 、 $K_2$ ——合格判定系数,见表 5-4-2。

表 5-4-2  $K_1$ 、 $K_2$  的值

$n$	10~14	15~24	$\geq 25$
$K_1$	1.70	1.65	1.60
$K_2$	0.90	0.85	

(2)当试块小于 10 组时,可用非统计方法按下述条件进行评定:

$$\bar{R} \geq 1.15 R \quad (5-4-3)$$

$$R_{\min} \geq 0.95 R \quad (5-4-4)$$

(3)实测项目中,水泥混凝土抗压强度评为合格时得满分,不合格时得零分。

(二)桥梁工程中各工序的质量检验标准可参考相关内容,各实测项目的规定分值参照《公路工程质量检验评定标准》JTJ071—94 中有关内容。

(三)施工单位应提交的质量保证资料

施工单位应有完整的施工原始记录、试验数据、分项工程自查数据等质量保证资料,并进行整理分析,负责提交齐全、真实和系统的施工资料和图表。应由监理工程师认可的资料,需经监理工程师鉴认。质量保证资料应包括以下 6 个方面:

- (1)所用材料、半成品和成品质量检验结果。
- (2)材料配合比、搅拌加工控制检验和试验数据。
- (3)地基处理和隐蔽工程施工记录。
- (4)各项质量控制指标的试验记录和质量检验汇总图表。
- (5)施工过程中遇到的非正式情况记录及其对工程质量影响分析。
- (6)施工中如发生质量事故,经处理补救后,达到设计要求的认可证明文件等。

### 三、工程质量评分方法

施工单位在各分项工程完工后,应按《公路工程质量检验评定标准》JTJ071—94 桥梁工程中所列基本要求,实测项目和外观鉴定进行自查。实行监理制度的应由监理工程师确认,质量监督部门根据抽查资料和确认的施工自查资料评分。

检验评以分项工程为评定单元,采用 100 分制评分方法。在分项工程评分基础上,逐级计算各相应分部工程、单位工程评分值和建设项目中单位工程优良率。

(一)分项工程评分方法

分项工程评分 = 实测项目中各检查项目得分之和 - 外观缺陷扣分 - 资料不全扣分。

扣分需注意:

(1)外观缺陷扣分。每一分项工程最多扣 5 分,较严重的外观缺陷,应进行整修处理,外观质量好不加分。

(2)资料不全扣分。按质量保证资料逐款检查,视资料不全情况,每款扣1~3分。

$$\text{检查项目合格率} = \frac{\text{检查合格的点(组数)}}{\text{该检查项目的全部检查点(组数)}} \times 100\%$$

$$\text{检查项目评定分数} = \text{检查项目规定分数} \times \text{合格率}$$

## (二)分部工程和单位工程评分方法

根据表5-4-1所列分项工程和分部工程区分为一般工程和主要(主体)工程,分别给以1和2的数值。进行分部工程和单位工程评分时,采用加权平均值算法确定相应的评分值。

$$\text{分部(单位)工程评分} = \frac{\sum[\text{分项(分部)工程评分} \times \text{相应权值}]}{\sum \text{分项(分部)工程权值}}$$

## (三)桥梁建设项目中单位工程优良率计算方法

$$\text{单位工程优良率} = \frac{\text{被评为优良的单位工程数量}}{\text{桥梁建设项目中单位工程总数}} \times 100\%$$

## 四、工程质量等级评定方法

工程质量评定分为优良、合格和不合格三个等级,应按分项、分部、单位工程和建设项目逐级评定。

### (一)分项工程质量等级评定

分项工程评分在85分及以上者为优良;70分及以上、85分以下者为合格;70分以下者为不合格。

经检查评为不合格的分项工程,允许进行加固、补强、返工或进行整修,当满足设计要求和评定标准后,可以重新评定其质量等级(即可复评为合格或优良)。但加固、补强改变了结构外形、造成历史缺陷者,不得评为优良。

### (二)分部工程质量等级评定

所属各分项工程全部合格,其加权平均分达85分及以上,且所含主要分项工程全部评为优良时,则该分部工程评为优良;如分项工程全部合格,但加权平均分为85分以下;或加权平均分虽在85分及以上,但主要分项工程未全部达到优良标准时,则该分部工程评为合格;如分项工程未全部达到合格标准时,则该分部工程为不合格。

### (三)单位工程质量等级评定

所属各分部工程全部合格,其加权平均分达85分及以上,且所含主要分部工程全部评为优良时,则该单位工程评为优良;如分部工程全部合格,但加权平均分为85分以下,或加权平均分虽在85分及以上,但主要分部工程未全部达到优良标准时,则该单位工程评为合格;若单位工程中的次要分部工程中的某主要分项工程评为合格,则该单位工程不能评为优良;若单位工程中的次要分部工程中的某主要分项评为合格,则该单位工程可能评为优良;如分部工程未全部达到合格标准时,则该单位工程为不合格。

#### (四)桥梁建设项目质量等级评定

所属单位工程全部合格且优良率在 80% 及以上时,则该桥梁建设项目评为优良;如单位工程全部合格,但优良率在 80% 以下时,则该桥梁建设项目评为合格;如单位工程未全部合格,则该桥梁建设项目不合格。

## 第二节 桥梁工程质量检验评定方法

### 一、沉入桩工程质量检查

#### (一)检查项目

##### (1)桩沉入后,桩身外观质量

检查内容:

桩身是否有劈裂和断桩现象。

检查方法:

观察检查。

##### (2)接桩

检查内容:

①接桩的焊接的焊肉厚度、焊波是否均匀;不得有击穿、咬肉、虚焊、夹渣等缺陷;焊接必须牢固。

②接桩后是否直顺。

检查方法:

观察和拉通线用尺量检查。

##### (3)钢管桩接桩焊接的电焊质量

检查内容:

钢管桩接桩焊接的电焊是否有裂纹、溶合程度、气孔的分布、夹渣状态等缺陷。

检查方法:

查阅探伤报告。

##### (4)沉入板桩接樁质量

检查内容:

①接樁是否整齐、排列直顺程度;

②接樁是否有脱樁缺陷。

检查方法:

观察检查。

## (二)允许偏差项目

沉入桩允许偏差应符合表 5-4-3 和表 5-4-4 的规定。

表 5-4-3 沉入桩允许偏差

序号	项目			允许偏差	检验频率		检验方法		
					范围	点数			
1	桩位	基础桩	中间桩		$d/2$	每根桩	1	用尺量	
			外缘桩		$d/4$				
		排架桩	顺桥纵轴线方向		支架上		40mm	1	用尺量
					船上		50mm		
	垂直桥纵轴线方向		支架上	50mm					
			船上	100mm					
	板桩	桩间距			有脱榫		1	观察	
		桩与基础边线或中线间距			$< 30\text{mm}$			用尺量	
2	△桩尖高程			$\pm 100\text{mm}$	1	用水准仪测量桩顶高程后计算			
3	△贯入度			不低于设计标准	1	查沉桩记录			
4	△斜桩倾斜度			$\pm 15\% \tan\theta$	1	用垂线测量计算			
5	△垂直桩垂直度			$L/100$	1	用垂线测量计算			

注 ①承受轴向荷载的摩擦桩,其控制入土深度应以高程为主,而以贯入度作参考;端承桩的控制入土深度应以贯入度为主,而以高度为参考;

②表中  $d$  为桩的直径或短边尺寸(mm);

③表中  $\theta$  为斜桩设计纵轴线与铅垂线间的夹角,单位:度(°)

④表中  $L$  为桩的长度(mm)。

## 二、灌注桩工程质量检查

### 检查项目

#### (1)水下混凝土浇筑质量。

检查内容:

浇筑水下混凝土时浇捣的密实度,是否有夹层和松散层的缺陷。

检查方法:

查阅施工记录的混凝土浇注量和导管的第一节底管长度应  $\geq 4\text{m}$ ;第一次浇筑混凝土,是否达到导管底端能埋入混凝土  $0.8 \sim 1.3\text{m}$ 。

#### (2)灌注桩允许偏差应符合表 5-4-5 的规定。

#### (3)桩基工程验收。

桩基验收时应提交下列资料：

表 5-4-4 沉入桩(钢管桩)允许偏差

序号	项目		允许偏差	检验频率		检验方法	
				范围	点数		
1	△停打标准		应符合设计规定		1	查沉桩记录	
2	桩位	顺桥纵轴线方向	$d/10$	每根桩	1	用经纬仪测量	
		垂直桥纵轴线方向	$d/5$		1		
		垂直桩垂直度	$L/100$		1		用垂直测量计算
		斜桩倾斜度	$\pm 15\% \tan\theta$		1		
		切割时桩顶高程	$\pm 15\text{mm}$		1	用水准仪测量	
		桩顶端面平整度	$\leq 10\text{mm}$		1	用水平尺测量	
		3	焊接		接头间隙	2mm	每根桩
接头上、 下管错口	$D < 700(\text{mm})$ $d \geq 700(\text{mm})$			2mm 3mm	1	用尺量	
咬肉深度	0.5mm			2			
加强层高度	2mm			2			
加强层厚度	盖过焊口每边不大于 3mm			2			

注 ①表中  $d$  为桩的直径(mm)；

②表中  $L$  为桩的长度(mm)；

③表中  $\theta$  为斜桩设计纵轴线与铅垂线间的夹角(°)。

表 5-4-5 灌注桩允许偏差

序号	项目		允许偏差	检验频率		检验方法	
				范围	点数		
1	△混凝土抗压强度		必须符合相关的规定		1	必须符合相关的规定	
2	△孔径		不小于设计规定		1	用探孔器检验	
3	△孔深		$+ 500\text{mm}$ $+ 0\text{mm}$		1	用测绳测量	
4	桩位	基础桩	100mm	每根桩	1	用尺量	
		排架桩	顺桥纵轴线方向		50mm		1
			垂直桥纵轴线方向		100mm		1
5	斜桩倾斜度		$\pm 15\% \tan\theta$		1	用垂线测量计算	
6	垂直桩垂直度		$L/100$		1		
7	沉淀厚度	摩擦桩	$0.5d$ ,且不大于 500mm	每根桩	1	开始灌注混凝土前 用测绳测量	
		端承桩	50mm				

注 ①表中  $\theta$  为斜桩纵轴线与铅垂线间的夹角,单位:度(°)；

②表中  $L$  为桩的长度(mm)；

③表中  $d$  为桩的直径(mm)。

①桩位测量放线图；

②工程地质勘察报告；

- ③材料试验记录；
- ④桩的制作和打入记录；
- ⑤桩位竣工平面图；
- ⑥桩的静载和动载试验的资料和确定贯入度的资料。

(4) 桩基验收的时间应符合。

- ①当桩顶设计高程与施工场地高程相同时,工程验收应待打桩完毕后进行；
- ②当桩顶设计高程低于施工场地高程需送桩时,在每一根桩的桩顶打至场地高程(单根灌注施工完毕)应进行中间验收,待全部打完,并挖至设计高程后,应再作检验。

### 三、沉井工程质量检查

(1) 检查项目。

①沉井内壁质量。

检查内容：

沉井下沉之后,井的内壁是否有透水和渗漏现象。

检查方法：

观察检查。

②封底质量。

检查内容：

A. 封底混凝土表面平整程度；

B. 封底是否渗漏现象；

检查方法：

观察和用靠尺、楔型塞尺检查。

(2) 允许偏差项目。

沉井下沉允许偏差应符合表 5-4-6 的规定。

表 5-4-6 沉井下沉允许偏差

序号	项目		允许偏差	检验频率		检验方法
				范围	点数	
1	△混凝土抗压强度		必须符合相关规定			必须符合相关规定
2	轴线位移	顺桥纵轴线方向	1% H (H < 10000mm 时,允许 100mm)	每根桩	2	用经纬仪测量
		垂直桥纵轴线方向	1.5% H (当 H < 10000mm 时,允许 150mm)		2	
3	沉井高程		± 100mm		4	用水准仪测量
4	垂直度		2% H		2	用垂线或经纬仪检验,纵、横向各计 1 点

注:表中 H 为沉井下沉深度(mm)

## 第五章 桥梁工程试验检测工作

### 第一节 概 述

#### 一、桥梁试验的意义与分类

在科学技术的发展过程中,科学试验起着非常重要的作用。从土木工程设计计算理论的演变历史来看,每一种理论体系的建立和发展,一般都和大量的科学试验、生产实践密切联系。试验研究对于推动和发展结构设计计算理论、解决生产实践中出现的疑难问题往往起到了重要的作用。

在桥梁工程的发展中,桥梁试验也起到了同样重要的作用。大量的试验研究,成为促进桥梁结构设计计算理论、设计方法不断发展的重要因素之一。桥梁试验是对桥梁原型结构或桥梁模型结构直接进行的科学试验工作,包括试验准备、理论计算、现场试验、分析整理等内容的一系列工作。桥梁原型试验也称之为桥梁检测,其目的是通过试验,掌握桥梁结构在试验荷载作用下的实际工作状态,判定桥梁结构的承载能力和使用条件,检验设计与施工质量。桥梁模型试验的目的是研究结构的受力行为,探索结构应力、应变的内在规律,为设计施工服务。随着交通事业的蓬勃发展,新结构、新材料、新工艺的不断涌现,桥梁工程的试验技术日益受到人们的重视,并不断得到发展和提高。桥梁试验的任务主要包括以下几个方面。

1. 确定新建桥梁结构的承载能力和使用条件。对于重要的桥梁结构在建成竣工后,通过桥梁试验考察该桥的施工质量与结构性能,判定桥梁结构的实际承载能力,为竣工

验收、投入运营提供科学的依据。对于新型或复杂的桥梁结构,通过系统的桥梁试验,可以掌握结构在荷载作用下的实际受力状态,探索结构受力行为的一般规律,为充实和发展桥梁结构的设计计算理论积累科学的资料。

2. 评估既有桥梁的使用性能与承载能力。对于既有桥梁结构在运营期间,因受水害、地震等自然灾害而损伤,或因设计施工不当而产生严重缺陷,或因使用荷载大幅度增长而严重超过设计荷载等级,通常通过桥梁试验来评估既有桥梁的使用性能与承载能力,为既有桥梁养护、加固、改建或限载对策提供科学的依据。这对于缺乏完整技术资料的既有桥梁更为必要。

3. 研究结构(构件)的受力行为,总结结构受力行为的一般规律。随着桥梁工程的不断发展,新结构、新材料、新工艺的推广应用,原有的规范、规程往往不能适应工程实践的要求。为了修改、完善既有的规范、规程,指导设计与施工工作,就需要进行大量的研究性试验。

在实际工作中,桥梁试验的种类很多,按照试验的目的与要求分类,可分为科学研究性试验和生产鉴定性试验。研究性试验的目的是为了建立或验证结构设计计算理论和经验公式,或验证某一结构理论体系中的科学假设判断的可靠性。研究性试验一般把对结构或构件的主要影响因素作为试验参数,试验结构的设计与数量均应按照具体研究目的的需要确定。根据实际情况,试验可在原型结构上进行,也可在模型结构上进行。研究性试验一般多采用模型结构,在专门的试验室内进行,利用特定的加载装置,以消除或减少外界因素的干扰影响,同时突出所要研究的主要因素。通过系统的模型试验,对测试资料数据加以分析论证,从而揭示出具有普遍意义的规律。生产鉴定性试验具有直接服务于生产实践的意义,一般以原型结构作为试验对象,在现场进行试验,根据一定的规范、标准的要求,按照有关设计文件,通过试验来确定结构的实际承载能力、使用性能和使用条件,检验设计施工质量,提出桥梁养护、加固、改建、限载对策,有效地保证桥梁结构的安全使用。生产鉴定性试验也称之为桥梁检测,包括静载试验、动载试验、无损检测与长期监控测试四个方面。在桥梁试验中,原型试验存在费用高、期限长、测试环境多变等不利的影响因素,如对一些大型桥梁进行多因素的研究性试验,有时是难以实现的。因此,结合原型桥梁进行模型试验往往成为科技工作者的一种有效手段,可以更为方便全面地研究主要影响因素之间的关系,探索结构行为的普遍规律,推动新结构、新材料、新工艺的发展与应用。

根据试验荷载作用的性质,桥梁试验可分为静荷载试验和动荷载试验。桥梁静载试验是将静止的荷载作用在桥梁上的指定位置而测试结构的静力位移、静力应变、裂缝等参量的试验项目,从而推断桥梁结构在荷载作用下的工作性能及使用能力。动载试验是

利用某种激振方法激起桥梁结构的振动,测定桥梁结构的固有频率、阻尼比、振型、动力冲击系数、行车响应等参量的试验项目,从而判断桥梁结构的整体刚度、行车性能。静载试验与动载试验虽然在试验目的、测试内容等方面不同,是两种性质的试验,但对于全面分析掌握桥梁结构的工作性能是同等重要的。

就试验对结构产生的后果来说,桥梁试验可分为破坏性试验和非破坏性试验。一般情况下,鉴定性试验多为非破坏性试验。但在某些情况下为了达到预定的试验目的,往往需要进行破坏性试验,以掌握试验结构由弹性阶段进入塑性阶段甚至破坏阶段时的结构行为、破坏形态等试验资料。实际上,原型结构的破坏试验,不论在费用上还是在方法上都存在一些具体的问题,特别是在结构进入破坏阶段后试验是比较困难的。因此,破坏试验一般均以模型结构为对象,在实验室内进行,以便能够较为方便可行地进行加载、控制、量测、分析,从而总结出具有普遍意义的规律,推广应用于原型结构。

按试验持续时间的长短,可分为长期试验和短期试验。鉴定性试验与一般性的研究试验多采用短期试验方法,只有那些必须进行长期观测的现象,如混凝土结构的收缩和徐变性能、桥梁基础的沉降等,才采用长期试验方法。此外,对于大型桥梁结构或新型桥梁结构常常采用长期观测或组织定期的检测,以积累这些结构长期使用性能的资料。

总之,结合具体的试验目的及要求,可选用一种或几种试验方法。在选择时应讲求经济成本,一般能用模型代替的,就不搞大规模的原型试验,通过非破坏性试验可以达到试验目的的,就不做破坏性试验。

## 二、桥梁检测的工作内容

桥梁检测的工作内容比较多,涉及到很多方面。从方法上来讲,分为静载试验、动载试验和无损检测;从时间上来看,分为短期试验和长期试验;从进行时期来看,分为成桥试验和施工阶段监测控制。一般情况下,桥梁现场检测可分为三个阶段,即准备规划阶段、加载与观测阶段和分析总结阶段。

准备规划阶段是桥梁检测顺利进行的必要条件。该阶段工作包括桥梁设计文件、施工记录、监理记录、原试验资料、桥梁养护与维修记录等桥梁技术资料的收集;桥梁现状如桥面系、承重结构构件、支座、基础等部位的表现检查;设计内力计算、加载方案制定、量测方案制定、仪器仪表选用等方面;也包括搭设工作脚手架、设置测量仪表支架、测点放样及表面处理、测试元件布置、测量仪器仪表安装调试等现场准备工作。可以说,检测工作的顺利与否很大程度上取决于检测前的准备工作。

加载与观测阶段是整个检测工作的中心环节。这一阶段的工作是在各项准备工作就绪的基础上,按照预定的试验方案与试验程序,利用适宜的加载设备进行加载,运用各

种测试仪器,观测试验结构受力后的各项性能指标如挠度、应变、裂缝宽度、加速度等,并采用人工记录或仪器自动记录手段记录各种观测数据和资料。有时,为了使某一加载、观测方案更为完善,可先进行试探性试验,以便更完满地达到原定的试验目的。需要强调的是,对于静载试验,应根据当前所测得的各种技术数据与理论计算结果进行现场分析比较,以判断受力后结构行为是否正常,是否可以进行下一级加载,以确保试验结构、仪器设备及试验人员的安全,这对于存在病害的既有桥梁结构进行试验时尤为重要。

分析总结阶段是对原始测试资料进行综合分析的过程。原始测试资料包括大量的观测数据、文字记载和图片等材料,受各种因素的影响,一般显得缺乏条理性与规律性,未必能深刻揭示试验结构的内在行为规律。因此,应对它们进行科学的分析处理,去伪存真、去粗取精,综合分析比较,从中提取有价值的资料。对于一些数据或信号,有时还需按照数理统计的方法进行分析,或依靠专门的分析仪器和分析软件进行分析处理,或按照有关规程的方法进行计算。这一阶段的工作,直接反映整个检测工作的质量。测试数据经分析处理后,按照相关规范、规程以及检测的目的要求,对检测对象做出科学的判断与评价。全部检测工作体现在最后提交的试验研究报告中。

混凝土无损检测技术是桥梁检测技术中一项重要的内容。所谓混凝土无损检测技术,是在不破坏混凝土内部结构和使用性能的情况下,利用声、光、热、电、磁和射线等方法,测定有关混凝土性能的物理量,推定混凝土的强度、缺陷等的测试技术。混凝土无损检测技术与破坏试验方法相比,具有不破坏结构的构件、不影响其使用性能、可以探测结构内部的缺陷、可以连续测试和重复测试等特点。应用混凝土无损检测技术,可以检测混凝土的强度、弹性模量、裂缝的深度和宽度,可以检查钢筋的直径、位置和保护层厚度,并可以探知混凝土的碳化程度、钢筋的锈蚀程度和混凝土构件的尺寸等参数。混凝土无损检测技术,对于进行施工质量检查与管理,进行既有结构的养护维修管理,评定既有混凝土结构的强度、耐久性及损伤程度是非常重要的。

对于大跨度桥梁,由于施工周期长,外界因素变化较大,为了确保施工能够较准确地实现设计意图,避免一些随机因素如温度、湿度、材料参数、施工误差对桥梁施工过程和成桥后状态造成过大的影响,就需要在施工过程中对每一施工阶段桥梁的线形、应力、内力等参数进行实时在线监测控制,逐阶段与设计目标值进行比较,并预测下一施工阶段这些参量的变化态势,以便必要时修正设计计算参数,采取控制调整措施,以逼近设计目标值,这就是施工控制。施工控制对于大跨度桥梁的建造具有非常重要的意义。

混凝土桥梁的一些时效因素如收缩、徐变、基础沉降、温度变化,往往使桥梁结构产生附加内力,可能造成桥面线形不平顺,严重时危及桥梁结构的安全运营。为了能够及时准确地掌握这些时效因素对结构的影响程度,了解这些时效因素对结构影响的变化

趋势,就需要在一个相对较长的时期内定期测量桥梁结构的线形、应变、内力、裂缝等参量,并对这些参量进行综合分析,以判断桥梁结构的实际状态,这类测试我们称之为长期监控测试。除此之外,对于一些重要桥梁或新型桥梁结构也常常采用定期检测的方法来积累这些结构长期使用性能的资料,以使规范更臻完善。

综上所述,桥梁检测是一门直接服务于工程实践的技术学科,涉及到桥梁的设计计算理论、试验测试技术、仪器仪表性能、数理统计分析、现场试验组织等方面,具有较强的综合性、应用性和复杂性。近 20 年来,随着桥梁工程的飞速发展,新结构、新材料、新工艺的不断涌现,桥梁荷载的不断趋于增大,以及大批既有桥梁结构进入老化期,因此桥梁检测工作就愈显重要,并对其提出了更高、更全面的要求;同时,随着自动化技术的不断发展及计算机的普及应用,使得测试技术、分析手段也取得了长足的进步。完全可以相信,桥梁检测将进一步地推动桥梁建设事业的发展,为确保桥梁安全运营、进行科学养护起到更加重要的作用。

## 第二节 桥涵地基检测

### 一、概述

天然地基上的浅基础,由于埋入地层深度较浅,施工一般采用敞开挖基坑修筑基础的方法。基坑挖至基底设计标高,或已按设计要求加固、处理完毕后,须经过基底检验,才可以进行基础圬工施工。

基底检验必须及时,以免使待检验基底暴露时间过久而改变原状土的结构或风化变质。

#### (一) 检验内容

应检验基底平面位置、尺寸大小、基底标高是否符合设计要求,偏差值是否在现行有关规定允许范围以内,检查基底地质情况和承载力是否与设计资料相符,检查基底处理和排水情况是否符合本规范要求,检查施工记录及有关试验资料,检验地基经加固、处理后的效果是否达到设计要求。

#### (二) 检验方法

按桥涵大小、地基土质复杂(如溶洞、断层、软弱夹层、易溶岩等)情况及结构对地基有无特殊要求,可采用以下检查方法:

1. 桥涵地基检验 :可采用直观或触探方法 ,必要时可进行土质试验。
2. 大、中桥和地基土质复杂、结构对地基有特殊要求的地基检验 ,一般采用触探和钻探(钻深至少 4m)取样做土工试验 ,或按设计要求进行荷载试验。

3. 特大桥按设计要求处理。

### (三)基底平面位置和标高允许偏差规定

1. 平面周线位置不小于设计要求。
2. 基底标高 :土质  $\pm 50\text{mm}$  ;  
石质  $+ 50\text{mm}$  ,  $- 200\text{mm}$ 。

### (四)检验注意事项

1. 如果地基经检验后 ,需要加固处理时 ,加固处理完毕 ,应再进行检验 ,合格后 ,才能进行基础施工。
2. 为了有较好的可比性 ,加固前后两次的测试项目应力求对应 ,甚至最好由同一组织 ,用同一仪器按同一标准进行。
3. 检验后应按规定格式填写“地基检验表” ,由参加检验人员签名 ,作为竣工验收原始资料。

## 二、地基承载力检测

地基容许承载力是在保证建筑物安全可靠 ,并符合正常使用要求的前提下 ,地基土在单位面积上所能承受荷载的能力 ,通常用荷载强度( $\text{kPa}$ )表示。

地基容许承载力的确定要考虑两方面的要求 ,即基础沉降量不超过容许值和保证地基有足够的稳定性。

地基容许承载力的测定方法有 野外荷载试验法、理论公式法、邻近旧桥涵调查对比综合分析确定法、贯入试验法以及按《公路桥涵地基与基础设计规范》推荐的方法确定地基容许承载力。

地基承载力的理论公式法只考虑地基的强度 ,没有考虑沉降的要求 ,而且是在作了一定简化假定的条件下导得的 ,且多数只针对条形荷载而言 ,因此使用很少。

### (一)按《公路桥涵地基与基础设计规范》确定地基容许承载力

《公路桥涵地基与基础设计规范》JTJ 024—85 是根据大量的桥涵工程建筑经验和荷载试验资料 ,综合理论和试验研究成果 ,通过统计分析制订而成。其步骤为 :

#### 1. 地基土的分类

根据土的天然结构、天然含水量、颗粒级配及塑性指数划分为六类 ,每一类又进行了细分。

- (1) 粘性土 :又分为一般粘性土、老粘性土、新近沉积粘性土和残积粘性土。
- (2) 砂土 根据颗粒组配可分为砾砂、粗砂、中砂、细砂与粉砂。
- (3) 碎石土 根据粒径与形状又分为 漂石、块石、圆砾、角砾。
- (4) 岩石 岩石名称根据岩块单轴抗压强度可分为 硬质岩、软质岩与极软岩。
- (5) 黄土 根据沉积年代的不同分为 新近堆积黄土、一般新黄土及老黄土等。
- (6) 多年冻土。

此外还有软土地基的容许承载力确定。

## 2. 确定地基容许承载力

当基础宽度  $b \leq 2m$  ,埋置深度  $h \leq 3m$  时 ,查表确定地基容许承载力。根据地基土的类别查相应的表 ,实测查表所需指标。例如老粘性土要测定压缩模量 ,而一般粘性土要实测孔隙比与液性指数。实测所需土样一定要在现场取天然状态的有代表性的土样(一般每个基础的地基不少于 4 个土样) 。细粒土的液限  $W_L$ 、液性指数  $I_L$  ,塑性指数  $I_p$  系指用 76g 平衡锥测定的数值。

### (1) 粘性土地基容许承载力检测

老粘性土、残积粘性土取土样测压缩模量然后查表面 5-5-1、表 5-5-2 确定容许承载力 ;一般粘性土 新近沉积粘性土取土样测天然含水量、天然密度、土粒密度与液塑限 ,计算孔隙比和液性指数 ,查 5-5-3、表 5-5-4 确定容许承载力。

表 5-5-1 老粘性土的容许承载力  $[\sigma_0]$

$E_s$ (MPa)	10	15	20	25	30	35	40
$[\sigma_0]$ (kPa)	380	430	470	510	550	580	620

注 :老粘性土是指第四纪晚更新世( $Q_3$ )及其以前沉积的粘性土。一般具有较高的强度和较低的压缩性

表 5-5-2 残积粘性土的容许承载力  $[\sigma_0]$

$E_s$ (MPa)	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$[\sigma_0]$ (kPa)	190	220	250	270	290	310	320	330	340

注 :本表适用于西南地区碳酸盐类岩层的残积红土。其他地区可参照使用。

表 5-5-3 一般粘性土的容许承载力  $[\sigma_0]$

$[\sigma_0]$ $e$	$I_L$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.3
	0.5	450	440	430	420	400	380	350	310	270	240	220	—	—
0.6		420	410	400	380	360	340	310	280	250	220	200	180	—

$[\sigma_0]$ $e$	$I_L$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.3
		0.7	400	370	350	330	310	290	270	240	220	190	170	160
0.8	380	330	300	280	260	240	230	210	180	160	150	140	130	
0.9	320	280	260	240	220	210	190	180	160	140	130	120	100	
1.0	250	230	220	210	190	170	160	150	140	120	110	—	—	
1.1	—	—	160	150	140	130	120	110	100	90	—	—	—	

注:1)一般粘性土是指第四纪全新世(Q<sub>4</sub>Ⅰ文化期以前)沉积的粘性土,一般为正常沉积的粘性土。

2)土中含有粒径大于2mm的颗粒重量超过全部重量30%以上的 $[\sigma_0]$ 可酌量提高。

3)当 $e < 0.5$ 取 $e = 0.5$ ;  $I_L < 0$ 时取 $I_L = 0$ 。此外,超过表列范围的一般粘性土 $[\sigma_0]$ 可按下式计算:

$$[\sigma_0] = 57.22 E_s^{0.57} \quad (5-5-1)$$

式中  $E_s$ ——土的压缩模量。

表 5-5-4 新近沉积粘性土的容许承载力 $[\sigma_0]$

$[\sigma_0]$ (kPa) $e$	$I_L$	$\leq 0.25$	0.75	1.25
		$\leq 0.8$	140	120
0.9	130	110	90	
1.0	120	100	80	
1.1	110	90	—	

注:新近沉积的粘性土是指文化期以来沉积的粘性土,一般为欠固结,且强度较低。

## (2) 砂土地基的容许承载力检测

砂土地基容许承载力的检测要通过颗粒分析定土名(见表5-5-5),并依据相对密度确定密实度(见表5-5-6),再根据湿度(水上、水下)查表5-5-7。

表 5-5-5 砂土的分类表

土的名称	颗粒组配
砾砂	粒径大于2mm的颗粒占全重25%~50%
粗砂	粒径大于0.5mm的颗粒超过全重的50%
中砂	粒径大于0.25mm的颗粒超过全重的50%
细砂	粒径大于0.1mm的颗粒超过全重的75%
粉砂	粒径大于0.1mm的颗粒不超过全重的75%

注:定名时应根据粒径分组由大到小以最先符合者确定。

表 5-5-6 砂土密实度表

分级		相 对 密 度 $D_r$	实测平均锤击数 $N_{63.5}$
密度		$D_r \geq 0.67$	30 ~ 50
中密		$0.33 \leq D_r < 0.67$	10 ~ 29
松散	稍松	$0.20 \leq D_r < 0.33$	5 ~ 9
	极松	$D_r < 0.20$	< 5

表 5-5-7 砂土的容许承载力 $[\sigma_0]$

土 名	密实度		密 度	中 密	松 散
	$[\sigma_0]$	湿度			
砾砂、粗砂	与湿度无关		550	400	200
中砂	与湿度无关		450	350	150
细砂	水上		350	250	100
细砂	水上		350	250	100
	水下		300	200	—
粉砂	水上		300	200	—
	水下		200	100	—

(3) 碎石土容许承载力的检测

碎石土的容许承载力首先要通过颗粒分析确定土名,见表 5-5-8,再根据土的天然骨架,开挖、钻探等难易程度划分密实程度,见表 5-5-9,然后查表确定容许承载力。

表 5-5-8 碎石土的分类表

土 的 名 称	颗 粒 形 状	颗 粒 级 配
漂石	圆形及亚圆形为主	粒径大于 200mm 的颗粒超过全重的 50%
块石	棱角形为主	
卵石	圆形及亚圆形为主	粒径大于 200mm 的颗粒超过全重的 50%
碎石	棱角形为主	
圆砾	圆形及亚圆形为主	粒径大于 200mm 的颗粒超过全重的 50%
角砾	棱角形为主	

注:定名时应根据粒径分组由大到小以最先符合者确定。

表 5-5-9 碎石土密实程度划分表

密实程度	骨架和充填物	天然坡和开挖情况	钻探情况
松散	多数骨架颗粒不接触而被充填物包裹,充填物松散	不能形成陡坎,天然坡接近于粗颗粒的安息角。锹可以挖掘、坑壁易坍塌,从坑壁取出大颗粒后,砂土即塌落	钻进较容易,冲击钻探时,钻杆稍有跳动,孔壁易坍塌
中密	骨架颗粒疏密不均,部分不连续。孔隙填满,充填物中密	天然坡不大稳定,或随坡下堆积物较多,但大于粗颗粒的安息角。镐可以挖掘,坑壁有掉块现象,从坑壁取出大颗粒处砂大不易保持凹面形状	钻进较难,冲击钻探时,钻杆、吊锤跳动不剧烈,孔壁有坍塌现象
密实	骨架颗粒交错紧贴,孔隙填满充填物密实	天然陡坡较稳定,坎下堆积物较小。镐挖掘困难,用撬棍不能松动,坑壁稳定,从坑壁取出大颗粒后,能保持凹面形状	钻进困难,冲击钻探时,钻杆、吊锤跳动剧烈,坑壁较稳定

## (4) 黄土的容许承载力检测

黄土地基首先根据表 5-5-10 进行分类,并根据实测黄土地基土的天然密度、天然含水量、土粒密度计算出孔隙比与液限,查表 5-5-11、表 5-5-12 与表 5-5-13 确定容许承载力。

表 5-5-10 黄土的分类表

时代		地层名称		特征
全新世 $Q_4$	近期	—	新黄土	新近堆积黄土 人类文化期内沉积物,多为坡、洪积层、不均匀,常含有砂砾、石块和杂物,一般有湿陷性,常具有高压缩性。
	早期	—		
晚更新世 $Q_3$		马兰黄土		老黄土 经成岩作用,较密实,壁立性强,具有一定大孔隙,常夹有砂姜石层和古土层,一般无湿陷性。
中更新世 $Q_2$		离石黄土		
早更新世 $Q_3$		午城黄土		

表 5-5-11 新近堆积黄土的容许承载力 [ $\sigma_0$ ]

$W/W_L$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0	1.2
[ $\sigma_0$ ] (kPa)	130	120	110	100	90	80	70

注:表列新近堆积黄土地为湿陷性黄土地基时、经人工处理后,其承载力按下列系数提高;

- ①人工夯实(用 0.5kN 的普通石夯,落距 50cm,分别夯三遍)提高 1.2;
- ②换土夯实(表层填卵石 16cm,三七石灰土(体积比三分石灰,七分土)4cm,电动蛙式机夯打 3~4 遍)提高 1.3;
- ③重锤夯实(包括表层 1~1.5m 厚度的夯实和回填夯实)提高 2.0;
- ④打石灰砂桩(其基础底面地期加固)提高 4.0。

表 5-5-12 一般新黄土容许承载力 $[\sigma_0]$

$[\sigma_0]$ (kPa) $w_L$	$w$	$\leq 10$	13	16	19	22	25	28	31	34
22		190	180	170	150	130	110	90	70	50
25		200	190	180	160	140	120	100	80	60
28		210	200	190	170	150	130	110	90	70
31		230	210	200	180	160	140	120	100	80
34		250	230	210	190	170	150	130	110	80
37		—	250	230	210	190	170	150	130	110
40		—	—	250	230	210	190	170	150	130
43		—	—	—	250	230	210	190	170	150

表 5-5-13 老黄土的容许承载力 $[\sigma_0]$

$\sigma_0$ (kPa)	< 0.7	0.7~0.8	0.8~0.9	> 0.9
< 0.6	700	600	500	400
0.6~0.8	500	400	300	250
> 0.8	400	300	250	200

注:山东老黄土性质较差,容许承载力 $[\sigma_0]$ 应降低 100~200kPa。

### 3. 计算修正后的地基容许承载力

地基容许承载力不仅与地基土的性质和状态有关,而且与基础底面尺寸和埋置深度

有关。因此,当基底宽度  $b > 2\text{m}$  基础埋置深度  $h > 3\text{m}$  且  $h/b \leq 4$  时,地基的容许承载力应修正,修正后的地基容许承载力  $[\sigma]$  可按下列式计算:

$$[\sigma] = [\sigma_0] + k_1 r_1 (b - 2) + k_2 r_2 (h - 3) + 10h_w \quad (5-5-2)$$

式中  $[\sigma]$ ——前述查表所得地基容许承载力,  $\text{kPa}$ ;

$b$ ——基础底面的最小边宽或直径( $\text{m}$ ),当  $b > 10\text{m}$  时,按  $10\text{m}$  计算,当  $b < 2\text{m}$  取  $b = 2\text{m}$

$h$ ——基础底面的埋置深度( $\text{m}$ ),对于受水流冲刷的基础,由一般冲刷线算起;不受水流冲刷者,由天然地面算起;位于挖方内的基础,由开挖后地面算起;当  $h \leq 3\text{m}$  时,取  $h = 3\text{m}$  计算;

$r_1$ ——基底下持力层土的天然重量( $\text{kN/m}^3$ )。如持力层在水面以下,且为透水性土时,应按浮容重  $r'$  计算;

$r_2$ ——基底以上土的重量( $\text{kN/m}^3$ )。如持力层在水面以下,且不透水,不论基底以上土的透水性如何,应一律采用饱和容重;如持力层透水,则一律用浮容重计算;当基底以上土由多层土组成时,应按加权平均法计算换算容重。 $(r_2 = \sum r_i h_i / \sum h_i)$ ;其中  $r_i h_i$  为基底以上各层土的容重和厚度);

$k_1$ 、 $k_2$ ——基础宽度和埋置深度的修正系数,按持力层土名查表 5-5-14;

$h_w$ ——平均常水位到一般冲刷线的深度( $\text{m}$ ),对水中基础,当持力层土不透水时考虑此项修正,若持力层透水,则不计此项。

表 5-5-14 地基土容许承载力宽度、深度修正系数

土的类别 系数	粘性土				黄土				砂土						碎石土					
	老粘性土	一般粘性土		新近沉积粘性土	残积粘性土	新近堆积黄土	一般新黄土	老黄土	粉砂		细砂		中砂		砾、粗砂		碎圆角砾砾		卵石	
		$I_L \geq 0.5$	$I_L < 0.5$						中密	密实	中密	密实	中密	密实	中密	密实	中密	密实	中密	密实
$k_1$	0	0	0	0	0	0	0	1.0	1.2	1.5	2.0	2.0	3.0	3.0	4.0	3.0	4.0	3.0	4.0	
$k_2$	2.5	1.5	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	4.0	5.5	5.0	6.0	5.0	6.0	6.0	10.0

注 ①对于稍松状态的砂土和松散状态的碎石土,  $k_1$ 、 $k_2$  值可采用表列中密值的 50%;

②节理不发育和较发育的岩石不作宽、深修正,节理发育或很发育的岩石  $k_1$ 、 $k_2$  可参照碎石的系数。对已风化砂土状者,参照砂土、粘性土的系数。

③冻土的  $k_1 = 0$ 、 $k_2 = 0$ 。

对于强度低、压缩性高的软土地基,其容许承载力 $[\sigma]$ 可按下式之一确定,但必须验证其基础的沉降量,使之同时满足稳定和变形的要求。

$$[\sigma] = \frac{5.14}{m} K_p \cdot C_u + \gamma_2 h \quad (5-5-3)$$

式中  $m$ ——安全系数,可视软土灵敏度及基础长宽比等因素选用 1.5~2.4;  
 $C_u$ ——不排水抗剪强度 kPa,可用三轴仪,十字板剪切仪或无侧限抗压试验测得;

$$K_p = \left(1 + 0.2 \frac{b}{a}\right) \left(1 - \frac{0.4}{a \cdot b} \cdot \frac{Q}{C_u}\right)$$

$r_2$ ——基底以上土的容量  $\text{kN/m}^3$  地下水位以下为浮容重;  
 $h$ ——基础埋置深度,  $\text{m}$ , 受水流冲刷由一般冲刷线算起;  
 $b, a$ ——基础的宽和长,  $\text{m}$  当有偏心荷载时,  $b, a$  分别由  $b', a'$  代替,  $b' = b - 2e_b$ ;  $a' = a - 2e_a$ ,  $e_b, e_a$  分别为荷载在基础宽度和长度方向的偏心距;  
 $Q$ ——荷载的水平分力  $\text{kN}$ 。

对小桥、涵洞基础也可按下式计算 $[\sigma]$ :

$$[\sigma] = [\sigma_0] + r_2(h - 3) \quad \text{kPa} \quad (5-5-4)$$

式中  $[\sigma_0]$ ——查表 5-5-15。

表 5-5-15 软土的 $[\sigma_0]$

$W\%$	36	40	45	50	55	65	75
$[\sigma_0]$ (kPa)	100	90	80	70	60	50	40

采用式(5-5-2)式(5-5-3)计算的基底容承载力不再按宽、深修正。

#### 4. 地基容许承载力的提高

用式(5-5-2)式(5-5-3)及式(5-5-4)计算的 $[\sigma]$ 值,适用于受荷载组合 I 的情况,若计算荷载为其他荷载组合时,容许承载力可按表 5-5-16 予以提高。当受地震力作用时,应按《公路工程抗震设计规范》规定采用。

#### (二)现场荷载试验确定地基容许承载力

现场荷载试验是将一块刚性承压板(常用面积是  $0.25 \sim 0.50\text{m}^2$  的方板或圆板)置于欲测定的地基表面(图 5-5-1)。在承压板上分级施加荷载,测定承压板变形稳定的沉降量,绘制荷载强度  $P$  与沉降量  $S$  的关系线,然后确定地基容许承载力。

表 5-5-16 地基土容许承载力的提高系数

序号	荷载与使用情况	提高系数(K)
一	荷载组合	1.0
二	荷载组合 II、III、IV、V	1.25
三	经多年压实未受破坏的旧桥基	1.5

注:1)荷载组合 V 中,当承受拱施工期间的单向恒载推力时, $k=1.50$ ;

2)各项提高系数不得互相迭加;

3)岩石旧桥基的容许承载力不得提高;

4)容许承载力小于 150kPa 的地基,对于表列第二项情况; $k=1.0$ ,对于第三项及注 1)情况, $k=1.25$ ;

5)表中荷载组合 I 如包括由混凝土收缩及徐变或水浮力引起的荷载效应,则与荷载组合 II 相同对待。

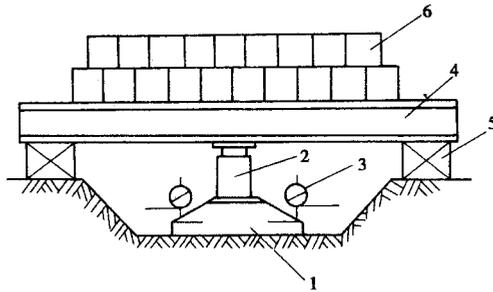
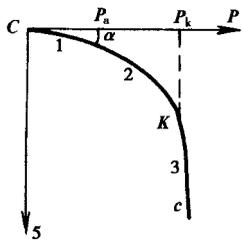


图 5-5-1 现场荷载试验

1—荷载板 2—千斤顶 3—百分表 4—反力梁 5—枕木垛 6—压重

分析荷载试验由开始加荷使地基变形到破坏的全过程,并结合  $P-S$  曲线,如图 5-5-2,可以把地基变形分为三个阶段。

图 5-5-2  $P-S$  曲线

1. 压密阶段:该阶段  $P-S$  曲线接近于直线,沉降的主要原因是地基土被压缩。土中各点剪应力均小于土的抗剪强度,土体处于稳定的弹性平衡状态。见  $P-S$  曲线  $oa$  段。

2. 局部剪切阶段: $a$  点后  $P-S$  曲线不再呈直线关系( $ak$  段),地基中已有局部区域(称为塑性变形区)的剪应力达到了土抗剪强度,首先在基础边缘处出现。随着荷载的持

续增加,地基土中塑性区的范围也逐步扩大,直到出现连续的滑动面,这一阶段,基础沉降有较大的增加。

3. 破坏阶段 超过  $k$  点后,塑性变形区已扩大到形成一个连续的剪裂面,促使地基土向基础四周挤出,地面隆起,基础急剧沉陷。以致完全丧失稳定性。

荷载作用下地基变形的三阶段见图 5-5-3、图 5-5-4 与图 5-5-5。

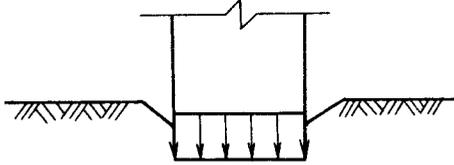


图 5-5-3 压密阶段

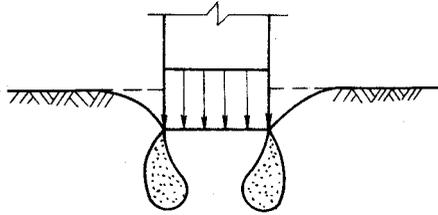


图 5-5-4 局部剪切阶段

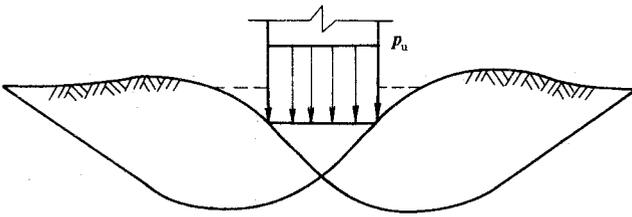


图 5-5-5 破坏阶段

由以上分析可见,  $a$  点和  $k$  点是地基变形的两个特征分界点。与  $a$  点对应的荷载强度  $P_a$  称为临塑荷载;与  $k$  点相对应的荷载强度  $P_k$  称为极限荷载。与塑性区最大深度  $Z_{\max}$  相应的荷载强度称为临界荷载,如  $Z_{\max} = b/4$  ( $b$  为基础宽度),临界荷载表示为  $P_{1/4}$ 。

对于典型的  $P-S$  曲线,能明显地找到临塑荷载  $P_a$ 、极限荷载  $P_k$  及临界荷载,地基容许承载力的确定如下:

1. 临塑荷载  $P_a$  或临界荷载 (如  $P_{1/4}$ ) 均能作为地基容许承载力;
  2. 地基容许承载力取极限荷载除以安全系数,即取  $P_k/K$  值,  $K$  一般用 1.5~2.0。
- 比较以上两种结果,取两者的较小值作为地基容许承载力。



$$N' = 30n/\Delta S$$

式中  $n$ ——所选取的锤击数；

$\Delta S$ ——相应于  $n$  的锤击量  $\rho m_0$ 。

(2) 旋转探杆, 提出贯入器, 取出贯入器中土样进行鉴别描述, 必要时送试验室分析。

(3) 由于钻杆的弹性压缩会引起功能损耗, 钻杆过长时传入贯入器的功能降低, 因而需要根据杆长对锤击数进行修正；

$$N = \alpha N'$$

式中  $N'$ ——实际记录的锤击数；

$\alpha$ ——修正系数, 根据钻杆长度由表 5-5-17 选用；

$N$ ——修正后的锤击数。

表 5-5-17 标准贯入试验触探杆长度修正系数值

钻杆长度(m)	≤3	6	9	12	15	18	21
$\alpha$	1.00	0.92	0.86	0.81	0.77	0.73	0.70

## 2. 标准贯入试验的应用

(1) 根据  $N$  确定天然地基的容许承载力 $[\sigma_0]$ , 见表 5-5-18、表 5-5-19；

(2) 根据  $N$  确定砂土的密实度, 见表 5-5-5。

表 5-5-18 砂土承载力标准值(kPa)

$N$	10	15	30	50
土类				
中、粗砂	180	250	340	500
粉、细砂	140	180	250	340

表 5-5-19 粘性土承载力标准值

$N$	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
$[\sigma_0]$ (kPa)	105	145	190	235	280	325	370	430	515	600	680

标准贯入试验因设备并不简单, 因而使用受限。近年轻便触探试验因设备操作方便, 越来越多地受到检测人员的欢迎。轻便触探试验设备主要由探头、触探杆、穿心锤三部分组成, 见图 5-5-7。触探杆采用直径 25mm 的金属管, 每根长 1.0~1.5m, 穿心锤重 10kg。穿心锤落距为 50cm, 使其自由下落, 将探头竖直打入土层中, 每打入土层 30cm 的锤击数即为  $N_{10}$ ;  $N_{10}$  经修正后查表 5-5-20、表 5-5-21 便可确定地基承载力标准值。

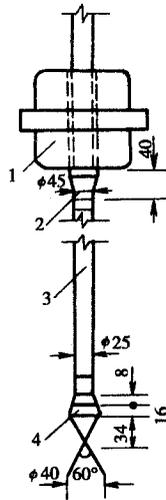


图 5-5-7 轻便触探试验设备(单位:mm)

1—穿心锤 2—锤垫 3—触探杆 4—探头

若需描述土层情况,可将触探杆拔出,取下钻头,换以轻便钻头,进行取样。

轻便触探仪一般用于贯入深度小于 4m 的土层。

表 5-5-20 粘性土承载力标准值

$N_{10}$	15	20	25	30
$[\sigma_0]$ (kPa)	105	145	190	230

表 5-5-21 素填土承载力标准值

$N_{10}$	15	20	30	40
$[\sigma_0]$ (kPa)	85	115	135	160

注:本表只适用于粘性土和粉土组成的素填土

贯入试验确定地基承载力说明;

(1)该部分主要参照《建筑地基基础设计规范》GBJ 7—89,因此,有些提法与交通部标准不一致,使用时请注意;

(2)标准贯入轻便触探确定地基承载力标准值时,参加统计的数据不宜小于六个;

(3)当根据标准贯入试验锤击数  $N$ ,轻便触探试验锤击数  $N_{10}$ 查表 5-5-18 表 5-5-21 确定地基承载力标准值时,现场试验锤击数应经下式修正:

$$N(\text{或 } N_{10}) = N - 1.645\sigma \quad (5-5-5)$$

### 第三节 桥梁荷载试验

#### 一、荷载试验的目的及主要内容

##### (一) 荷载试验的目的

桥梁荷载试验分静载试验和动载试验。进行桥梁荷载试验的目的是检验桥梁整体受力性能和承载力是否达到设计文件和规范的要求,对于新桥型及桥梁中运用新材料、新工艺的,应验证桥梁的计算图式,为完善结构分析理论积累资料。对于旧桥通过荷载试验可以评定出其运营荷载等级。

##### (二) 荷载试验的主要内容

桥梁的荷载试验是一项复杂而细致的工作,技术含量高,应根据荷载试验的目的进行认真的调查,必要时进行相关的理论分析。在此基础上周密地考虑试验的全过程,预计可能出现的问题及处理方法,制定出切实可行的试验计划(包括荷载试验的主要内容)。荷载试验的主要内容为:

- (1) 荷载试验的目的;
- (2) 试验的准备工作;
- (3) 加载方案设计;
- (4) 测点设置与测试;
- (5) 加载控制与安全措施;
- (6) 试验结果分析与承载力评定;
- (7) 试验报告编写。

##### (三) 荷载试验的准备工作

荷载试验正式进行之前应做好下列准备工作。

##### 1. 试验孔(或墩)的选择

对多孔桥梁中跨径相同的桥孔(或墩)可选1~3孔具有代表性的桥孔(或墩)进行加载试验。选择时应综合考虑以下因素:

- (1) 该孔(或墩)计算受力最不利;
- (2) 该孔(或墩)施工质量较差、缺陷较多或病害较严重;
- (3) 该孔(或墩)便于搭设脚手架,便于设置测点或便于实施加载。

选择试验孔的工作与制定计划前的调查工作结合进行。

## 2. 搭设脚手架和测试支架

脚手架和测试支架应分开搭设互不影响,脚手架和测试支架应有足够的强度、刚度和稳定性。脚手架要保证工作人员的安全、方便操作。测试支架要满足仪表安装的需要,不因自身变形影响测试的精度,同时还应保证试验时不受车辆和行人的干扰。脚手架和测试支架设置要因地制宜,就地取材,便于搭设和拆卸,一般采用木支架或建筑钢管支架。当桥下净空较大不便搭设固定脚手架时,可考虑采用轻便活动吊架,两端用尼龙绳或细钢丝绳固定在栏杆或人行道缘石上。整套设置使用前应进行试载以确保安全,活动吊架如需多次使用可做成拼装式以便运输和存放。

晴天或多云天气下进行加载试验时,阳光直射下的应变测点,应设置遮挡阳光的设备,以减小温度变化造成的观测误差。雨季进行加载试验时,则应准备仪器、设备等的防雨设施,以备不时之需。

桥下或桥头用活动房或帐篷搭设临时实验室安放数据采集等仪器、并供测试人员临时办公和看管设备之用。

## 3. 静载试验加载位置的放样和卸载位置的安排

静载试验前应在桥面上对加载位置进行放样,以便于加载试验的顺利进行。如加载工况较少,时间允许,可在每次工况加载前临时放样。如加载工况较多,则应预先放样,且用不同颜色的标志区别不同加载工况时的荷载位置。

静载试验荷载卸载的安放位置应预先安排。卸载位置的选择既要考虑加卸载方便,离加载位置近一些,又要使安放的荷载不影响试验孔(或墩)的受力,一般可将荷载安放在桥台后一定距离处。对于多孔桥,如有必要将荷载停放在桥孔上,一般应停放在距试验孔较远处以不影响试验观测为度。

## 4. 试验人员组织及分工

桥梁的荷载试验是一项技术性较强的工作,最好能组织专门的桥梁试验队伍来承担,也可由熟悉这项工作的技术人员为骨干来组织试验队伍。应根据每个试验人员的特长进行分工,每人分管的仪表数目除考虑便于进行观测外,应尽量使每人对分管仪表进行一次观测所需的时间大致相同。所有参加试验的人员应能熟练掌握所分管的仪器设备,否则应在正式开始试验前进行演练。为使试验有条不紊地进行,应设试验总指挥1人,其他人员的配备可根据具体情况考虑。

## 5. 其他准备工作

加载试验的安全设施、供电照明设施、通讯联络设施、桥面交通管制等工作应根据荷载试验的需要进行准备。

## 二、加载方案和测点设置

### (一)加载方案与实施

#### 1. 试验荷载工况的确定

为了满足鉴定桥梁承载力的要求,荷载工况选择应反映桥梁设计的最不利受力状态,简单结构可选1~2个工况,复杂结构可适当多选几个工况,但不宜过多。进行各荷载工况布置时可参照截面内力(或变形)影响线进行,下面给出常见桥型荷载工况。

#### (1)简支梁桥

跨中最大正弯矩工况

$l/4$  最大正弯矩工况

支点最大剪力工况

桥墩最大竖向反力工况

#### (2)连续梁桥

主跨跨中最大正弯矩工况

主跨支点负弯矩工况

主跨桥墩最大竖向反力工况

主跨支点最大剪力工况

边跨最大正弯矩工况

#### (3)悬臂梁桥(T型刚构桥)

支点(墩顶)最大负弯矩工况

锚固孔跨中最大正弯矩工况

支点(墩顶)最大剪力工况

挂孔跨中最大正弯矩工况

#### (4)无铰拱桥

跨中最大正弯矩工况

拱脚最大负弯矩工况

拱脚最大推力工况

正负挠度绝对值之和最大工况

此外,对桥梁施工中的薄弱截面或缺陷修补后的截面可以专门进行荷载工况设计,以检验该部位或截面对结构整体性能的影响。

使用车辆加载而又未安排动载试验项目时,可在静载试验项目结束后,将加载车辆(多辆车则相应地进行排列)沿桥长慢速行驶一趟,以全面了解荷载作用于桥面不同部位

时结构承载状况。

动载试验一般安排标准汽车车列(对小跨径桥也可用单车)在不同车速时的跑车试验,跑车时速一般定为5km、10km、20km、30km、40km、50km。此外可根据桥况安排其他试验项目,如需测定桥梁承受活载水平力性能时作车辆制动试验,为测定桥梁自振频率作跳车后的余振观测,并在无荷载时进行脉动观测。

## 2. 试验荷载等级的确定

### (1) 控制荷载的确定

为了保证荷载试验的效果,必须先确定试验的控制荷载,控制桥梁设计的荷载有下列几种:

- ①汽车和人群(标准设计荷载);
- ②挂车或履带车(标准设计荷载);
- ③需通行的特殊重型车辆。

分别计算以上几种荷载对结构控制截面产生的内力(或变形)的最不利值,进行比较,取其中最不利者对应的荷载作为控制荷载。因为挂车和履带车不计冲击力,所以动载试验以汽车荷载作为控制荷载。

荷载试验应尽量采用与控制荷载相同的荷载,而组成控制荷载(标准设计荷载)的车辆是由运管车辆统计而得的概率模型。当客观条件所限,采用的试验荷载与控制荷载有差别时,为保证试验效果,在选择试验荷载的大小和加载位置时采用静载试验效率 $\eta_q$ 、动载试验效率 $\eta_d$ 进行控制。

### (2) 静载试验效率

静载试验效率为

$$\eta_q = \frac{S_s}{S(1 + \mu)}$$

式中  $S_s$ ——静载试验荷载作用下控制截面内力计算值;

$S$ ——控制荷载作用下控制截面最不利内力计算值;

$\mu$ ——按规范采用的冲击系数,平板挂车、履带车、重型车辆,取 $\mu = 0$ 。

$\eta_q$ 值可采用0.8~1.05,当桥梁的调查、检算工作比较完善而又受加载设备能力所限, $\eta_q$ 值可采用低限;当桥梁的调查、检算工作不充分,尤其是缺乏桥梁计算资料时, $\eta_q$ 值应采用高限。总之应根据前期工作的具体情况来确定,一般情况下 $\eta_q$ 值不宜小于0.95。

荷载试验宜选择温度稳定的季节和天气进行。当温度变化对桥梁结构内力影响较大时,应选择温度内力较不利的季节进行荷载试验,否则应考虑用适当增大静载试验效率 $\eta_q$ 来弥补温度影响对结构控制截面产生的不利内力。

当控制荷载为挂车或履带车而采用汽车荷载加载时,考虑到汽车荷载的横向应力增大系数较小,为了使截面的最大应力与控制荷载作用下截面最大应力相等,可适当增大静载试验效率  $\eta_d$ 。

### (3) 动载试验效率

动载试验效率为 
$$\eta_d = \frac{S_d}{S}$$

式中  $S_d$ ——动载试验荷载作用下控制截面最大计算内力值;

$S$ ——标准汽车荷载作用下控制截面最大计算内力值(不计入汽车荷载冲击系数)。

$\eta_d$  值一般采用 1。动载试验的效率不仅取决于试验车型及车重,而且取决于实际跑车时的车间距。因此在动载试验跑车时应注意保持试验车辆之间的间距,并采用实际测定跑车时的车间距作为修正动载试验效率  $\eta_d$  的计算依据。

### 3. 静载加载分级与控制

为了加载安全和了解结构应变和变位随试验荷载增加的变化关系,对桥梁荷载试验的各荷载工况的加载应分级进行。

#### (1) 分级控制的原则

①当加载分级较为方便时,可按最大控制截面内力荷载工况均分为 4~5 级。

②当使用载重车加载,车辆称重有困难时也可分成 3 级加载。

③当桥梁的调查和验算工作不充分,或桥况较差,应尽量增多加载分级。如限于条件,加载分级较少时,应注意每级加载时,车辆荷载应逐辆缓缓驶入预定加载位置,必要时可在加载车辆未到达预定加载位置前分次对控制测点进行读数监控,以确保试验安全。

④在安排加载分级时,应注意加载过程中其他截面内力亦应逐渐增加,且最大内力不应超过控制荷载作用下的最不利内力。

根据具体条件决定分级加载的方法,最好每级加载后卸载,也可逐级加载,达到最大荷载后逐级卸载。

#### (2) 车辆荷载加载分级的方法

①逐渐增加加载车数量

②先上轻车后上重车

③加载车位于内力影响线的不同部位。

④加载车分次装载重物。

以上各法亦可综合采用。

#### (3) 加卸载的时间选择

为了减少温度变化对试验造成的影响,加载试验时间以 22:00 至晨 6:00 为宜。尤其是采用重物直接加载,加卸载周期比较长的情况下只能在夜间进行试验。对于采用车辆等加卸载迅速的试验方式,如夜间试验照明等有困难时亦可安排在白天进行试验,但在晴天或多云的天气下进行加载试验时每一加卸载周期所花费的时间不宜超过 20min。

#### (4) 加载分级的计算

根据各荷载工况的加载分级按弹性阶段计算结构各测点在不同荷载等级下计算变位(或应变),以便对加载试验过程进行分析和控制。计算采用的材料弹性模量,如已作材料试验的用实测值,未作材料试验的可按规范规定取值。

#### 4. 加载设备的选择

静载试验加载设备可根据加载要求及具体条件选用,一般有以下两种加载方式。

##### (1) 可行式车辆

可选用装载重物的汽车或平板车,也可就近利用施工机械车辆。选择装载的重物时要考虑车厢能否容纳得下,装载是否方便,装载的重物应置放稳妥,以避免车辆行驶时因摇晃而改变重物的位置。

采用车辆加载优点很多,如便于调运和加载布置,加卸载迅速等。采用汽车荷载既能作静试验又能作动载试验。这是较常采用的一种方法。

##### (2) 重物直接加载

一般可按控制荷载的着地轮迹先搭设承载架,再在承载架上堆放重物或设置水箱进行加载。如加载仅为满足控制面内力要求,也可采取直接在桥面堆放重物或设置水箱的方法加载。承载架的设置和加载物的堆放应安全、合理,能按要求分布和加载重量,并不使加载设备与桥梁结构共同承载而形成“卸载”现象。

重物直接加载准备工作量大,加卸载所需周期一般较长,交通中断时间亦较长,且试验时温度变化对测点的影响较大,因此宜于安排夜间进行试验。

此外其他一些加载方式也可根据加载要求因地制宜采用。

#### 5. 加载重物的称量

可根据不同的加载方法和具体条件选用以下方法,对所加载进行称量。

##### (1) 称重法

当采用重物直接在桥上加载时,可将重物化整为零称重后按逐级加载要求分堆置放,以便加载取用。

当采用车辆加载时,可将车辆逐轴开上称重台进行称重。如没有现成可供利用的称重台,可自制专用称重台进行称重。

##### (2) 体积法

如采用水箱加载,可通过测量水体积来换算水的重力。

### (3)综合计算法

根据车辆出厂规格确定空车轴重(注意考虑车辆零配件的更换和添减,汽油、水、乘员重力的变化)。再根据装载重物的重力及其重心将其分配至各轴。装载物最好采用规则外形的物体整齐码放或采用松散均匀料在车箱内摊铺平整,以便准确确定其重心位置。

无论采用何种确定加载物重力的方法,均应作到准确可靠,其称量误差最大不得超过5%。最好能采用两种称重方法互比较核。

## (二)测点设置

### 1. 测点布设

#### (1)主要测点的布设

测点的布设不宜过多,但要保证观测质量。有条件时,同一测点可用不同的测试方法进行校对,一般情况下,对主要测点的布设应能控制结构的最大应力(应变)和最大挠度(或位移)。几种常用桥梁体系的主要测点布设如下。

- ①简支梁桥:跨中挠度,支点沉降,跨中截面应变。
- ②连续梁桥:跨中挠度,支点沉降,跨中和支点截面应变。
- ③悬臂梁桥:悬臂端部挠度,支点沉降,支点截面应变。
- ④拱桥:跨中 $\frac{l}{4}$ 处挠度,拱顶 $\frac{l}{4}$ 和拱脚截面应变。

挠度观测测点一般布置在桥中轴线位置。截面抗弯应变测点应设置在截面横桥向应力可能分布较大的部位,沿截面上、下缘布设,横桥向测点设置一般不少于3处,以控制最大应力的分布。

当采用测点混凝土表面应变的方法来确定钢筋混凝土结构中钢筋承受的拉力时,考虑到混凝土表面已经和可能产生的裂缝对观测的影响,测点的位置应合理进行选择。如凿开混凝土保护层直接在钢筋上设置拉应力测点,则在试验完后必须修复保护层。

#### (2)其他测点的布设

根据桥梁调查和检算工作的深度,综合考虑结构特点和桥梁目前状况等可适当加设以下测点:

- ①挠度沿桥长或沿控制截面桥宽方向分布;
- ②应变沿控制截面桥宽方向分布;
- ③应变沿截面高分布;
- ④组合构件的结合面上、下缘应变;
- ⑤墩台的沉降、水平位移与转角,连拱桥多个墩台的水平位移;
- ⑥剪切应变;

- ⑦其他结构薄弱部位的应变；
- ⑧裂缝的监测测点。

一般应实测控制断面的横向应力增大系数,当结构横向联系构件质量较差,联接较弱时则必须测定控制截面的横向应力增大系数。简支梁跨中截面横向应力增大系数的测定,既可采用观测跨中沿桥宽方向应变变化的方法,也可采用观测跨中沿桥宽方向挠度变化的方法进行计算或用两种方法互校。

对于剪切应变测点一般采取设置应变花的方法进行观测。为了方便,对于梁桥的剪应力也可在截面中性轴处主应力方向设置单一应变测点来进行观测。梁桥的实际最大剪应力截面应设置在支座附近而不是支座上。

### (3) 温度测点的布设

选择与大多数测点较接近的部位设置 1~2 处气温观测点,此外可根据需要在桥梁主要测点部位设置一些构件表面温度观测点。

## 三、静载试验仪器设备

桥梁静载试验需测结构的反力、应变、位移、倾角、裂缝等物理量。常用的仪器有百分表、千分表、位移计、应变仪、应变计(应变片)、精密水准仪、倾角仪、刻度放大镜等。这些测试仪器按其工作原理可分为机械测试仪器、电测仪器与光测仪器等。机械测试仪器具有安装与使用方便、迅速、读数可靠的优点,但需要搭设观测脚手架,而且所需试验人员多,观测读数费时,不便于自动记录,电测仪表安装测试比较麻烦,影响测试精度的因素也较多,但测试较方便,便于数据自动采集记录,操作安全。荷载试验应根据测试内容和量测值的大小选择仪器,试验前应对测试值进行理论分析估计,选择仪器的精度和量测范围,同时满足有关规程对仪器精度和量测范围的要求,本节介绍几种常用的仪器设备。

### (一) 机械式位移计

机械式位移计包括百分表、千分表及张线式位移和挠度计等,其构造和工作原理基本相同,主要区别在于精度和量程不同。

百分表和千分表是一种多功能仪表,与其他附属装置配套后可用于量测位移、应变、力、倾角等。

百分表的工作原理,就是利用齿轮转动机构所检测位置的位移值放大,并将检测的直线往复运动转换成指针的回转动,以指示其位移数值。百分表的分辨度为 0.01mm,通常量程为 5mm 或 10mm。百分表构造见图 5-5-8。

千分表是一种测微位移计,其结构和百分表基本相同,只是多了一对齿轮使灵敏度提高了 10 倍,其分辨度为 0.001mm,量程为 1mm 或 3mm。

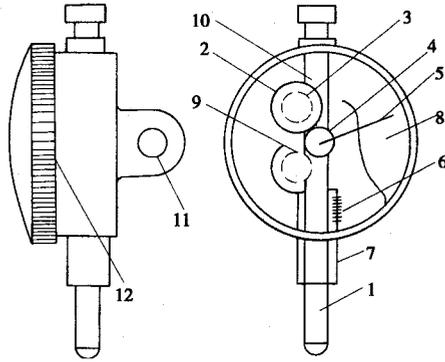


图 5-5-8 百分表构造图

1—测杆 2—小齿轮 3、9—扇形齿轮 4—中央齿轮 5—长针；  
6—弹簧 7—轴颈 8—躯体 10—平齿 11—孔环 12—表盘

### 1. 张线式位移量测系统

由百分表、挠度计与张线钢丝等组成量测系统,见图 5-5-9。张线钢丝直径为 0.3~0.5mm,一端接在桥梁结构的测点上,另一端悬吊重物,位移计(百分表)通过夹具和钢丝相连。结构受载产生位移引起钢丝移动,钢丝可带动位移计移动,随指针转动位移计可测出位移变化量。

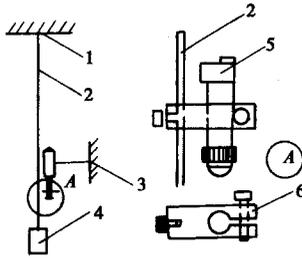


图 5-5-9 张线式位移量测系统

1—结构上测点 2—细钢丝 3—不动点 4—重物 5—位移计测杆 6—夹具

### 2. 用位移计测应变

应变就是结构上某区段纤维长度相对变化( $\epsilon = \Delta L/L$ )。应变仪就是用来测定这个长度变化的仪器。

采用特制的夹具将位移计安装在结构表面测定应变,具有精度高、量程大的特点。当应变值变化范围很大或需用大标距测定应变时,采用这种装置是非常合适的。

图 5-5-10 所示为位移计应变量测装置。固定位移计和顶杆的夹具,可用钢、铜或铝合金等制成,按照选定的标距以粘或预埋的方式固定在结构需量测应变的部位上。

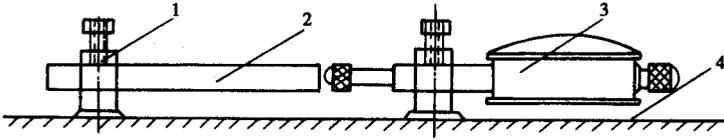


图 5-5-10 位移计应变测量装置

1—金属夹头 2—顶杆 3—位移计 4—试件

粘贴是最常用的固定方式。在混凝土结构上贴夹具时,应先将混凝土表面用砂轮打磨,除去泥灰再用细砂布磨光,用丙酮等擦净,随后用胶粘剂将夹具按选定的标距粘上,待胶粘剂固化后,即可安装位移计量测。

位移计应变测量装置主要用于量测结构构件的轴向应变。常用的量测标距对混凝土为 10~20cm。对砖石砌体则更大。

对受荷载后会发生曲率变化的构件,不宜用位移计应变测量装置来测定其表面的应变。因为位移计测杆与构件表面之间有一段距离,当构件发生曲变化时,所测得的应变有时是虚应变(又称视应变),同时顶杆与位移计测杆接触点发生移动影响量测。因此,仅当构件截面变形满足平截面假定,且曲率变化很小时,才能从所测得的虚应变值推算出实际应变。

## (二)手持式应变仪

当需要在现场较长期连续地观测结构的应变时,一般的应变仪不适用,手持应变仪则比较适用。此种仪器的外形见图 5-5-11,构造原理见图 5-5-12。

此仪器的主要部分是千分表 4,它固定在一根金属杆 1 上,其测杆则自由地顶在另一金属杆 6 的突出部分上,两金属杆之间用两片富有弹性的薄钢片 3 相连,因而能平行地相对移动,每根金属杆的一端带有一个尖形插轴 2,两插轴间的距离  $L$  即仪器的标距。后二次读数差即为结构在区段  $L$  内的变形  $\Delta L$ ,  $\Delta L$  除以标距  $L$  即得杆件的应变值。

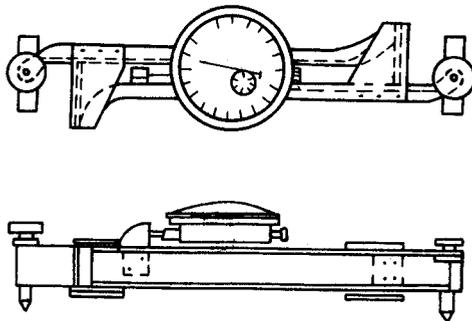


图 5-5-11 手持式应变仪外形

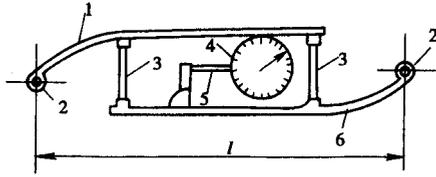


图 5-5-12 手持式应变仪构造原理

1—刚性的金属杆 2—插轴(尖形) 3—薄钢片 4—千分表 5—千分表的测杆 6—刚性的金属杆

仪器的各部分合理地选用不同膨胀系数的金属制造,因而使仪器读数受仪器本身的温度影响得到最大限度的消除。

仪器不是固定在测点上,而是读数时才安上去。因此,为了保证仪器工作稳定可靠,标距两端的小孔必须钻得和仪器的插轴钢尖相吻合。因测量时仪器钢尖和测孔间的接触稳定与否,直接影响到量测的准确性,如果测孔打得不标准,将使钢尖和测孔的接触不稳定,增大读数误差,甚至无法读取稳定的读数。

使用此种仪器,尚有一温度影响问题,即在长期量测过程中,初读数和加载量不可能在同一温度条件下读取,因此在量测读数中不仅包含了受载应变  $\epsilon$ ,而且还包含了温度应变  $\epsilon_t$ 。为了从读数中扣除温度部分的影响,就要在量测过程中进行“温度补偿”。一般较常用的温度补偿办法是采用与结构同一材料的“补偿块”和杆件放在一起,同时取得读数,从“补偿块”上取得的读数为单纯的温度应变,并将此应变作为结构的温度应变  $\epsilon_t$ 。但是,补偿块与结构两者体积差别极为悬殊,两者对气温变化的敏感程度差别很大,由于补偿块体积小,能在短时间内跟上气温的变化,而结构表现为极大的“滞后”。因此在气温变化较大时(例如白天日照情况下)实际上无法起到补偿作用。

为了达到补偿目的,根据量测的实践,建议采取“横向温度补偿法”。在布置测应变的测点的同时,在垂直方向布置测点,如图 5-5-13 所示。

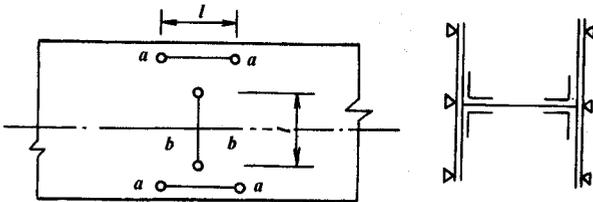


图 5-5-13 测点布置

测点  $a-a$ 、 $b-b$ 、 $c-c$  等分别为杆件应变测点,  $d-d$  为温度补偿测点,它垂直于应

变测点,且在杆件中部。

当对测点  $a - a$ 、 $b - b$ 、 $c - c$  进行读数时,也对测点  $d - d$  进行读数。则

$$\epsilon'_a = \epsilon_a + \epsilon_t, \epsilon'_b = \epsilon_b + \epsilon_t, \epsilon'_c = \epsilon_c + \epsilon_t, \epsilon'_d = \epsilon_t - \mu\epsilon_b,$$

式中  $\mu$ ——材料泊桑比;

$\epsilon_t$ ——表示温度应变;

$\epsilon'_a$ 、 $\epsilon'_b$ 、 $\epsilon'_c$ 、 $\epsilon'_d$ ——测点  $a - a$ 、 $b - b$ 、 $c - c$ 、 $d - d$  的综合应变读数。

联解上述四式得:

$$\begin{aligned} & \mu\epsilon'_b + \epsilon_d \\ \epsilon_t &= \frac{\mu\epsilon'_b + \epsilon_d}{1 + \mu} \\ \epsilon_a &= \epsilon'_a - \frac{\mu\epsilon'_b + \epsilon'_d}{1 + \mu} \\ \epsilon'_b &= \frac{\epsilon'_b - \epsilon'_d}{1 + \mu} \\ \epsilon_c &= \epsilon'_c - \frac{\mu\epsilon'_b + \epsilon'_d}{1 + \mu} \end{aligned}$$

量测时应注意:手持式应变仪操作简单,但量测的精度会随操作人员和每次操作方式的改变而改变。所以,量测时不宜更换使用者;要使仪器与试件表面垂直;每次对仪器施加的压力要尽量相等,并使仪器插足时应在同一孔穴等,以减小量测误差。

### (三)水准管式倾角仪

图 5-5-14 示水准管式倾角仪的构造,其原理是利用高灵敏度的水准管来测定结构节点、截面或支座处转角。水准管 1 安置在弹簧片 4 上,一端铰接于其座 6,弹簧片使另一端上升,但被测微计的微调螺钉 3 顶住,将仪器用夹具 5 装在测点后,用微调螺钉使水准管的气泡调平居中,结构变形后气泡漂移,再转动微调螺钉使气泡重新居中,度盘上前后二次读数差即代表该测点的转角。这种仪器最小读数有的可达  $1'' \sim 2''$ ,量程为  $3^\circ$ 。

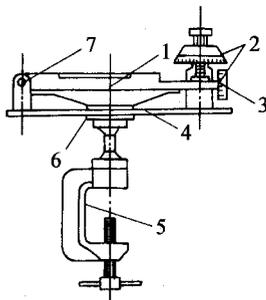


图 5-5-14 水准管式倾角仪

1—水准管 2—刻度盘 3—微调螺钉 4—弹簧片 5—夹具 6—基座 7—活动铰

这种仪器的优点为尺寸小、精度高、使用简便。缺点是受外界温度影响很大,且不宜受阳光曝晒,以免水准管爆裂。

#### (四)电阻应变仪

用电阻式应变仪测试桥梁结构应变时需用应变仪和电阻应变片(应变计)配合使用。

##### 1. 电阻应变片

电阻应变片又称电阻应变计,简称应变片或电阻片。它是非电量电测中最重要的变换器。大量的试验表明:电阻丝电阻值的增量与其长度的增量之间存在正比例的关系:即:

$$\Delta R/R = K\Delta L/L = K \cdot \epsilon \quad (5-5-6)$$

式中  $R$ ——电阻丝的初始电阻值  $\Omega$ ;

$\Delta R$ ——电阻丝的电阻增量  $\Omega$ ;

$L$ ——电阻丝的初始长度,mm;

$\Delta L$ ——电阻丝长度的增量,mm;

$K$ ——比例系数,称为电阻丝的灵敏系数;

$\epsilon$ ——应变值。

电阻丝的灵敏系数  $K$  对大多数电阻丝而言是个常数,也就是说上式所表达的电阻丝电阻变化率与应变变化率成线性关系,这便是通过电阻应变片将非电量转换成电量的理论基础。当电阻应变片用胶粘剂粘贴在构件上,应变片与构件的变形完全同步,这时电阻丝的应变值就代表了构件的应变值,于是实现了构件的应变测量转换成电量的量测。

应变片电测法与其他测试方法比较,有如下的一些优点。

①灵敏度高。由于利用电阻片将非电量转换为电量,再经电子仪器进行放大、显示和记录,所以能获得很高的放大倍数,从而达到很高的灵敏度。电阻应变仪可以精确地分辨出  $1 \times 10^{-6}$  应变,这个应变的量级对于钢材而言相当于 0.2MPa 的应力。

②电阻片尺寸小且粘贴牢固。对一些工程结构(如船体、桥梁、飞机、桁架等)进行全面的应力分析时,往往要测量数十点甚至数百点的应力,电阻片很容易大量粘贴使用。对于结构十分紧凑以至其他测量仪表(如杠杆引伸仪)根本无法安装的情况下,电测法就能发挥很大的作用。尺寸大小另一个重要意义在于可以用来测量局部应力。现在电阻片的标距甚至可以小于 1mm,这对于应力集中区的测量比较合适。

③电阻片质量小。它使得电测不仅可以作静态应力的测量,而且可以在动态应力分析方面发挥独特作用。对一系列重要的动力学参数(如加速度、振幅、频率、冲击力及爆炸压力等)能够比较精确地进行实验研究。同时应变片的基长可以制作得很短,并且有很高的频率响应能力。因此在应变梯度较大的构件上测量时仍能获得一定的准确度,在

高频动应变测量中具有很好的动态响应。

④可以在高温(100~800℃)、低温(-100~-70℃)、高压(上万个大气压)、高速旋转(每分钟几千转至几万转)、核辐射等特殊条件下成功的使用。

此外,由于应变片输出是电信号,易于实现测量数字化和自动化。

应变片电测法在用于对结构物表面应变测量时的主要缺点是:粘贴工作量大,重复使用困难等。

### (1)电阻应变片的构造

绕线式应变片主要由敏感元件1、基底2、覆盖层3、和引出线4等几部分组成,见图5-5-15。

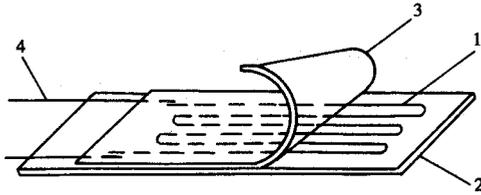


图 5-5-15 电阻应变片的构造

1—敏感丝栅 2—基底 3—覆盖层 4—引出线

①敏感丝栅是应变片的主要元件,一般由康铜、镍铬合金制成。

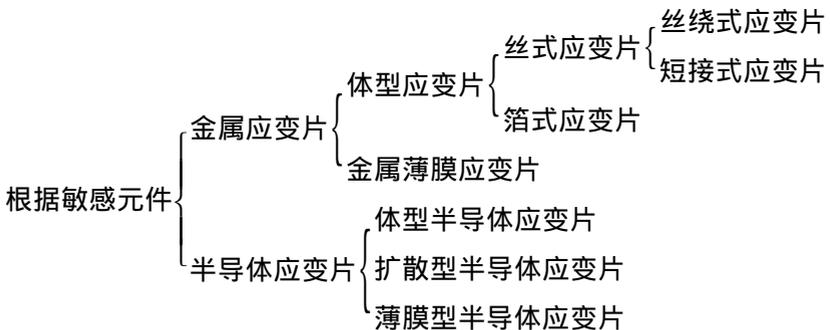
②基底和覆盖层起定位和保护应变片几何形状的作用,也起到与被测试件之间绝缘作用。纸基常用厚度0.015~0.02mm的机械强度高、绝缘性能好的纸张制作。胶基则使用性能稳定、绝缘度高、耐腐蚀的聚合胶制成。其他有特殊要求的应变片,可采用不同的材料做成基底。

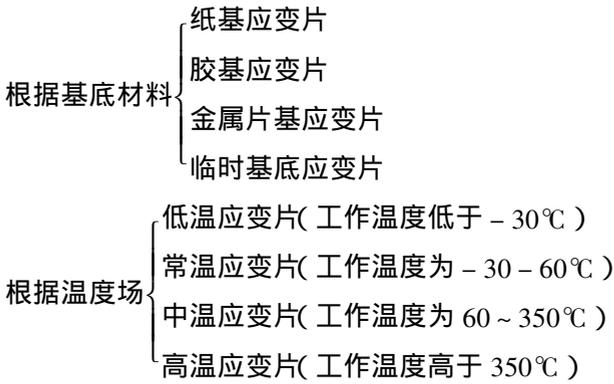
③引出线是用以连接导线的过渡部分,一般用直径约为0.15~0.30mm的金属丝。

④粘结剂把丝栅基底和覆盖层牢固地结成一个整体。

### (2)电阻应变片的分类

应变片的种类很多,至今各种规格的应变片已有二万多种。根据不同的方法,有如下分类:





此外,按敏感栅的长度分,有大标距应变片和小标距应变片;按敏感栅形状分,有单轴应变片和应变花。还有各种特殊用途的应变片如防磁应变片、防水应变片、埋入式应变片、层式应变片、可拆式应变片、疲劳寿命片、测压片、无基底式应变片、大应变片、裂缝探测片、温度自补偿应变片等。

①绕丝式应变片

用电阻丝盘绕起来的电阻片称为金属绕丝式电阻应变片,又称为圆角线栅式(图 5-5-16)。它的制造设备和技术都较简便,但横向灵敏度较箔式应变片为大(横向灵敏度会给测量带来一定的误差)。丝式应变片常用的金属材料是康酮、镍铬合金和铂钛金等。



图 5-5-16 金属丝式应变片

②箔式应变片

箔式应变片是由照相、光刻技术腐蚀成丝。它在性能上的优点是粘贴牢固、散热条件好、逸散功率大,可以允许较大电流、耐蠕变和漂移的能力强,易做成任意形状,但它工艺较复杂。箔片的材料主要为康酮、镍铬合金等,其形式见图 5-5-17。

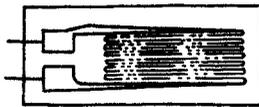


图 5-5-17 金属箔式应变片

在两向应力状态时,需要测出一点的两个或三个方向的应变,才可求出此测点的主

应力的大小和方向。这就要使用粘贴在一个公共基底上,按一定方向布置的 2~4 个敏感栅组成的电阻应变片,这种应变片叫做电阻应变花。见图 5-5-18 所示。

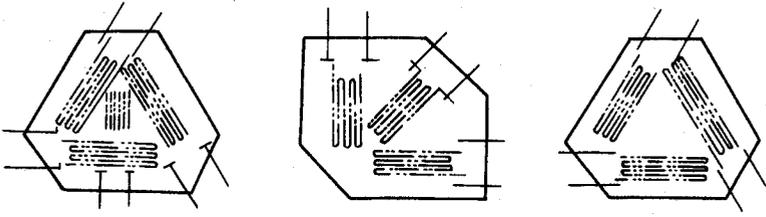


图 5-5-18 应变花

对于箔式应变片组成的应变花,因其横向效应系数极小,故不考虑修正问题。对于由半圆头丝绕式应变片组成的应变花,如果对测试结构要求不很严格的话,也不必考虑修正。

### ③ 半导体应变片

半导体应变片的外形如图 5-5-19 所示。它的优点是灵敏度高、频率响应好、可以做成小型和超小型应变片。半导体应变片的出现为应变电测技术的发展开创了新的途径。它的缺点是温度系数大、稳定性不及金属应变片等。

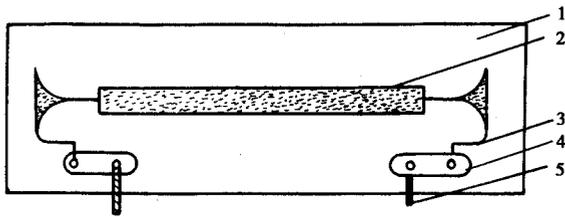


图 5-5-19 半导体应变片

1—胶膜衬底 2—P-Si 片 3—内引线 4—接板 5—外引线

### (3) 电阻应变片的选用

选用应变片时应根据应变片的初始参数及试件的受力状态、应变梯度、应变性质、工作条件、测试精度要求等综合考虑。

对于一般的结构试验,采用  $120\Omega$  纸基金属丝应变片就可满足试验要求。其标距可结合试件的材料来选定,如钢材常用 5~20mm,混凝土则用 40~120mm,石材用 20~40mm。

对于有特殊要求的,可选择特种应变片,如低温应变片、高温应变片、疲劳寿命片、裂纹探测片、应力片以及高压、核辐射、强磁场等条件下使用的应变片。

#### (4) 电阻应变片的粘贴技术

##### ① 粘结剂

粘贴应变片用的粘结剂称为应变胶。应变胶应能可靠地将试件应变传递到应变片的敏感栅上。

对应变胶的性能要求是 粘结强度高( 剪切强度一般不低于  $3 \sim 4 \text{MPa}$  ) 电绝缘性能好、蠕变小、化学稳定性好等。在特殊条件下 ,还要考虑一些其他要求 ,例如耐高温、耐老化、耐介质( 油、水、酸和碱等 ) 耐疲劳等。目前常用的应变胶分为有机胶和无机胶两类。常温下用有机胶 ,无机胶则用于高温应变片的粘贴。

常规桥梁试验粘贴应变片的应变胶一般为快干胶和热固性树脂胶等。

501 快干胶和 502 快干胶是借助于空气中微量水分的催化作用而迅速聚合固化产生粘结强度的。该类胶粘结强度能满足桥梁应变测试要求 ,但随生产厂家产品质量和存放时间长短 粘结强度差别很大 ,只能在低温、干燥和避光的条件下保存。

环氧树脂胶是靠分子聚合反应而固化产生粘结强度的。它有较强的剪切强度和防水性能 ,电绝缘性能好。它的主要成分是环氧树脂 ,并酌量加入固化剂和增韧剂等配制而成。环氧树脂胶可以自制 ,其配方是 :

环氧树脂 100%

邻苯二甲酸二丁脂            5% ~ 20%

乙二胺                         6% ~ 7%

注意 :乙二胺有毒 ,须通风操作。

##### ② 应变片的粘贴技术

应变片的粘贴是应变电测技术中一个很关键的环节 ,粘贴质量的好坏直接影响测量的结果。有时可能因某些主要测点的应变片失效 ,导致测量工作失败。因此 ,必须掌握粘贴技术 ,保证测量结果的准确性和可靠性。粘贴时应掌握下列技术环节。

选片 用放大镜对应变片进行检查 ,保证选用的应变片无缺陷和破损。同批试验选用灵敏系数和阻值相同的应变片 ,采用兆欧表或万用表对其阻值进行测量 ,保证误差不大于  $0.5\Omega$ 。

定位 先初步画出贴片位置 ,用砂布或砂轮机将贴片位置打磨平整 ,钢材表面粗糙度  $R_a$  为  $12.5 \sim 3.2$  混凝土表面无浮浆、麻面与气泡 ,必要时涂底胶处理 ,待固化后再次打磨。在打磨平整的部位准确画出测点的纵、横中心及贴片方向。

贴片 用镊子夹脱脂棉球蘸酒精( 或丙酮 )将贴片位置清洗干净。用手握住应变片引出线 ,在其背面均匀涂抹一层胶水 ,然后放在测点上 ,调整应变片的位置 ,使其准确定位。在应变片上覆盖小片玻璃纸 ,用手指轻轻滚压 ,挤出多余胶水和气泡。注意不要使

应变片位置移动。用手指轻按 1~2min,待胶水初步固化后,即可松手。粘贴质量较好的应变片,应是胶层均匀,位置准确。

干燥固化 干燥才能固化,当气温较高,相对湿度较低的短期试验,可用自然干燥,时间一般 1~2d。人工干燥:待自然干燥 12h 后,用红外线灯烘烤,温度不要高于 50℃,还要避免骤热,烘干到绝缘电阻符合要求时为止。

根据环境要求,应变片有时要进行防潮和防机械损伤处理。

## 2. 电阻应变仪

专门对电阻应变片阻值相对变化  $\Delta R/R$  的信号进行鉴别和量测的仪器,称为电阻应变仪。电阻应变仪按使用内容的不同分为静态应变仪、动态应变仪和静动态应变仪。用于静态应变量测的称为静态电阻应变仪。

### (1) 国产 YJS-14 型静态数字应变仪

常用的国产 YJS-14 型静态数字应变仪是一种静态应变自动测量装置,主要由五个部分组成。

①转换器:它在控制器控制下将各测点依次接入桥路,以便进行测量。

②电阻应变仪:由桥压线性放大器和数字电压表组成。测点经自动切换装置接入,信号经过载保护单元鉴别后进入放大器,经线性放大,解调和滤波成为直流信号送入积分型 A/D 转换器转换成 8-4-2-1 码数字量。

③运算器:由贮存和运算单元组成。

④控制器:包括采样控制和数字钟两部分。它以不同的速率发出测量指令,通过应变仪和运算器,对各类测点进行定时、定点、定区间的测量和修正。

⑤输出装置:分为打印输出和信息输出两种。

该应变测量装置的工作过程就是把应变测量组成惠斯登桥路。电桥的初始不平衡采用初始值存贮的办法,即把每一个测点的初始不平衡值通过放大和 A/D 转换器转换成数字信号,记入对应序号内存中。在测量时,测量信号也转换成数字信息送入运算器,运算器从内存中取出对应测点的转换或测量区段的选择,均由控制器控制。YJS-14 型数字应变测量装置最多可联四台转换器,每台 100 点共 400 点,其原理框见图 5-5-20。

### (2) 静态电阻应变仪的工作原理

电阻应变仪中主要是通过惠斯登电桥原理来量测应变所引起的电阻变化的微小信号。该电桥以电阻  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  作为四个桥臂,如图 5-5-21 所示。桥路中  $R_1$  与  $R_2$ 、 $R_3$  与  $R_4$  分别串联,两组并联于 A、C 两端,在 AC 端接有电源,另一对角 BD 上接有测量仪表。

由惠斯登电桥原理可知,当电桥平衡时,满足条件: $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 。

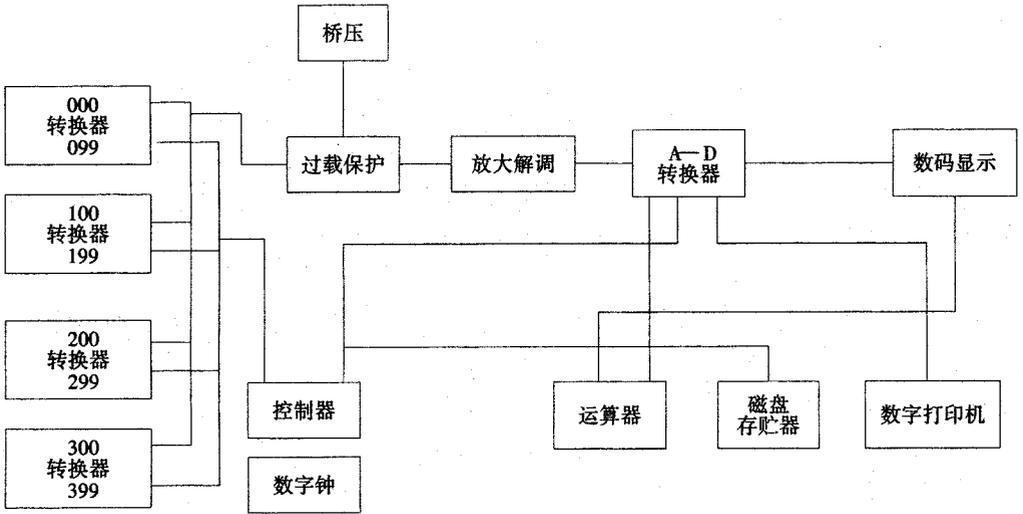


图 5-5-20 YJS-14 型静态数字应变仪原理框图

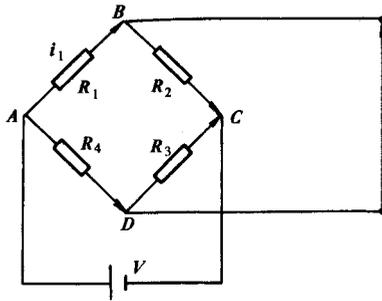


图 5-5-21 惠斯登电桥

当电桥工作时,若  $R_1$  有一增量  $\Delta R_1$ , 则破坏了电桥平衡,此时

$$V_{AB} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} \times V \quad (5-5-7)$$

为简化分析,设  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$

$$V_{AB} = \frac{R + \Delta R_1}{2R + \Delta R_1} \times V \quad (5-5-8)$$

于是

$$V_o = V_{AB} - V_{AD} = V \left( \frac{R + \Delta R_1}{2R + \Delta R_1} - 1/2 \right) = \frac{\Delta R_1}{4R + 2\Delta R_1} \times V \quad (5-5-9)$$

如果  $\Delta R_1 \leq R$  则有

$$V_o = \frac{V}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R} = \frac{V}{4} K \epsilon_1 \quad (5-5-10)$$

用同样的分析方法也可说明两个桥臂电阻  $R_1$ 、 $R_2$  变化(半桥)的情况,此时输出电压表达式为

$$V_o = \frac{V}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} \right) = \frac{V}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (5-5-11)$$

如果四个桥臂电阻都有变化(全桥式桥路),则输出电压可用下式表示:

$$V_o = \frac{V}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} \right) = \frac{V}{4} K (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (5-5-12)$$

根据以上基本关系式,可看出电桥的输出与桥臂电阻的相对增量  $\Delta R/R$  或应变  $\epsilon$  成正比的关系。

### (3) 电阻应变测量的温度补偿

用应变片测量应变时,应变片除了能感受结构受力后的变形外,同样也能感受环境温度变化,并引起电阻应变仪指示部分的示值变动,这称为温度效应。

温度变化从两方面使应变片的电阻值发生变化。第一是电阻丝温度改变  $\Delta t$ ,其电阻将会随之而改变  $\Delta R_\beta$ 。第二是因为材料与应变片电阻丝的线膨胀系数不相等,但二者又粘合在一起,这样温度改变  $\Delta t$ ,应变片中产生了温度应变,引起一附加的电阻的变化  $\Delta R_\alpha$ 。总的温度效应  $R_t$  为两者之和。

$$R_t = \Delta R_\alpha + \Delta R_\beta = (\alpha_j - \alpha) \Delta t + \beta_1 \Delta t / K \quad (5-5-13)$$

式中  $\alpha_j$ ——结构材料的线胀系数;

$\alpha$ ——电阻丝的线胀系数;

$\Delta t$ ——温差;

$K$ ——电阻丝的灵敏系数;

$\beta_1$ ——电阻丝的电阻温度系数。

温度效应的应变值  $\epsilon_t$  又称为视应变。当采用镍铬合金丝制成的应变片进行测量时,温度变动  $1^\circ\text{C}$ ,会在钢材( $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ )中产生相当于  $1.5 \text{ MPa}$  左右的应力示值变动,这是不容忽视的,必须加以消除。消除温度产生的应变值主要是利用惠斯登电桥桥路的特性进行,称为温度补偿。在电桥  $BC$  臂直接一个与测量片  $R_1$  同样阻值的应变片  $R_2$ ,  $R_2$  称为温度补偿应变片。测量片  $R_1$  粘贴在受力结构上,它既受应变作用又受温度作用  $\Delta R_1 = \Delta R_\epsilon + \Delta R_t$ 。补偿片  $R_2$  贴在一个与结构材料相同,具有同样温度变化条件的一个不受外力作用的小试件上,  $\Delta R_2 = \Delta R_t$ 。此时,电桥对角线上的电流计的反应为  $\Delta R_1 - \Delta R_2 = \Delta R_\epsilon + \Delta R_t - \Delta R_t = \Delta R_\epsilon$ ,测得结果仅是结构受力后产生应变值,而温度效应所产生的视应变就消除了。

在实际试验中,为保证补偿效果,对应变片的设置应考虑如下因素。

①补偿片与工作片应该是同批产品,具有相同电阻值、灵敏系数和几何尺寸。

②贴补偿片的试块材料与试验结构的材料一致,如果是混凝土材料,应该是同样的配合比,按相同的制作方法并在相同条件下养护的。

③补偿片的贴片干燥、防潮处理等工艺必须与工作片相同。

④连接补偿片的导线应与连接工作片的导线是同一规格同一长度,并且相互平行靠近布置图或捆扎成束。

⑤补偿片与工作片的位置应最接近,使二者处于同样温度场条件下,以防不均匀热源的影响。

⑥补偿片的数量,由试验材料特性、测点位置、试验条件等因素决定。一般情况下,钢结构可用一个补偿片同时补偿 10 个工作片,对混凝土可用一个补偿片补偿 5~10 个工作片。如果要求严格或者是某个测点所处条件特殊时,应单独补偿,以尽量减少由于工作片与补偿片工作时间不同而产生的温差影响。

除桥路补偿外,还有应变片温度自补偿的办法,即使用一种特殊的应变片,当温度变化时,其电阻增量等于零或者相互抵消而不产生视应变。目前主要用于机械类试验中。

### 3. 电阻应变测量的桥路连接

在桥路中,联接在同一桥臂上的应变片的电阻的变化是电阻应变片阻值之和,而联结在相邻桥臂上的应变片的电阻变化则是应变片阻值之差,利用这一特点,结合温度补偿片设置办法,电阻应变片在测量电桥中可以有不同的接法,以便达到实现温度补偿、测量出所需的应变成分、扩大读数以减少读数误差这三个目的。

在试验中,应变片与电桥的联接有半桥与全桥两种接线法。

#### (1) 半桥式接线方法

这是电测中最常用的联接方法。将两个相同规格的应变片分别接在桥臂  $AB$ 、 $BC$  上, $R_1$  是工作片、 $R_2$  是补偿片,如图(5-5-22a)所示,为了测量需要,有时  $R_1$ 、 $R_2$  都作为工作片,并且又互为温度补偿片,如图(5-5-22b)所示的按半桥式接线法,可以进行下列应变测量:

##### A. 拉伸、压缩的应变测量

图(5-5-22a)为拉伸应变测量的联接方法。 $R_1$  感受外力变形和温度变化的影响, $R_2$  只感受温度变化的影响,两个应变片同处一个温度场中,温度变化的影响便消除了,所测得的即为与试件轴线相一致的应变值。

$$\Delta R = K \cdot R_1 \cdot \epsilon \quad (5-5-14)$$

图(5-5-22b)为压缩应变测量的联接方式, $R_2$  与  $R_1$  垂直,反映试件以力后的横向变形。

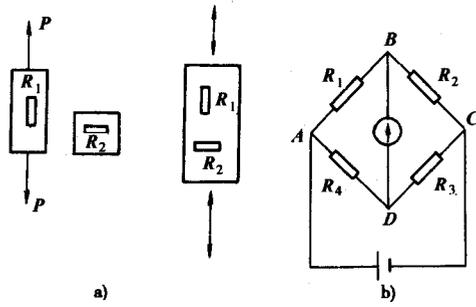


图 5-5-22 测量拉伸和压缩时应变片的布置及电桥联结

$$\Delta R = \Delta R_1 - \Delta R_2 = K \cdot R \cdot \epsilon (1 + \mu) \quad (5-5-15)$$

式中  $\mu$ ——试件材料的泊松比。

此时仪器的灵敏度增大到原来的  $(1 + \mu)$  倍。

### B. 弯曲应变的测量

有两种粘贴应变片的方法可量测试件弯曲应变  $\epsilon_m$ ，如图 5-5-23。

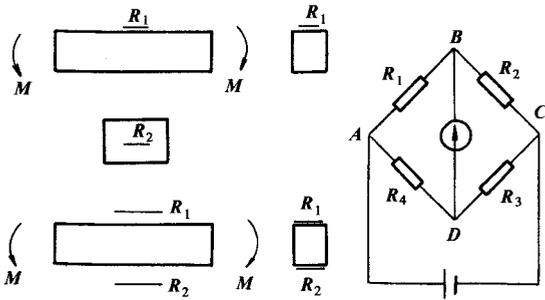


图 5-5-23 测量弯曲应变时应变片的布置及电桥联接

图(5-5-22a)所示,在被测试件上只粘贴一个  $R_1$  应变片,  $R_2$  为补偿片,此时弯曲变形及温度变形引起的增量为:

$$\Delta R = K \cdot R \cdot \epsilon_m \quad (5-5-16)$$

图(5-5-22b)所示,应变片分别贴在受弯截面的上、下纤维上,当应变片规格相同并在同一温度场中,且试件材质均匀、对称,受弯曲时:

$$\Delta R = 2K \cdot R \cdot \epsilon_m \quad (5-5-17)$$

此时,测量的灵敏度提高 1 倍。

此外,还可用半桥法测剪切应变及弯曲和拉(压)复合作用下的应变。

### (2) 全桥式接线方法

在四个桥臂上全部接上工作片,如图 5-5-24 所示。这种桥路联接方式既能提高量测的灵敏度,又能解决互为补偿的问题。由于四个应变片的电阻改变的绝对值相同,所以仪器上得到的读数为单贴一片工作片时的四倍,即实测应变为仪器读数的四分之一。

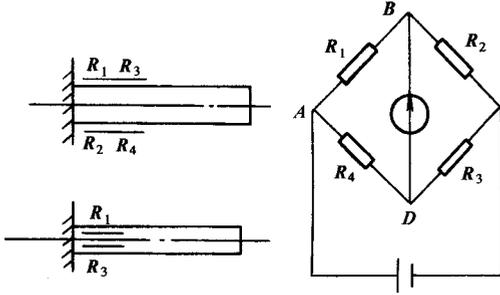


图 5-5-24 用全桥接法测量应变时应变片的布置及桥路联接

#### 四、静载试验

静载试验应在现场指挥统一指挥下按计划有秩序进行。首先检查不同分工的测试人员是否各行其职;交通管理、加载(或司机)和联络人员是否到位;加载设备、通讯设备和电源(包括备用电源)是否准备妥当;加载位置测点放样和测试仪器安装是否正确。然后调试仪器(自动记录时对测试仪表数据采集和记录设备进行联接),利用过往车辆(或初试荷载)检查各测点的观测值的规律性,使整个测试系统进入正常工作状态。然后记录气候天气情况和试验开始时间,进行正式试验。

##### (一) 试验观测与记录

##### 1. 温度稳定观测

仪表安装完毕后,一般在加载试验之前应对各测点进行一段时间的温度稳定观测,中间可每隔 10min 读数一次。观测时间应尽量选择加载试验时外界气候条件对观测造成误差的影响范围,用于测点的温度影响修正。

##### 2. 仪表的测读与记录

人工读表时,仪表的测读应准确、迅速,并记录在专门的表格上(表 5-5-22,表 5-5-23),以便于资料的整理和计算。记录者应对所有测点量测值变化情况进行检查,看其变化是否符合规律,尤其应着重检查第一次加载时量测值变化情况。对工作反常的测点应检查仪表安装是否正确,并分析其他可能影响其正常工作的原因,及时排除故障。对于控制测点应在故障排除后重复一次加载测试项目。

表 5-5-22 电阻应变仪应变观测记录表

仪器型号：\_\_\_\_\_ 仪器采用灵敏系数：\_\_\_\_\_ 应变单位：

电阻片标距：\_\_\_\_\_ mm 电阻片灵敏系数：

应变计算修正系数：\_\_\_\_\_

观点号													
		读数	应变	修正应变	总应变	读数	应变	修正应变	总应变	读数	应变	修正应变	总应变
观测时间	加载程序												

表 5-5-23 面分表挠度(位移)观测记录表

仪器型号：\_\_\_\_\_ 挠度(位移) 单位 0.01mm

观点号													
		读数	位移	总位移									
观测时间	加载程序												

当采用仪器自动采集数据记录时,应对控制点的应变和位移进行监控,测试结果规律异常时,应查明原因采取补救措施。将记录结果整理成表 5-5-22 表 5-5-23 的格式,以便进行结果分析,并与原始记录一同保存备查。

### 3. 裂缝观测

加载试验中裂缝观测的重点是结构承受拉力较大部位及旧桥原有裂缝较长、较宽的部位。在这些部位应测量裂缝长度、宽度,并在混凝土表面沿裂缝走向进行描绘。加载过程中观测裂缝长度及宽度的变化情况,可直接在混凝土表面进行描绘记录,也可采用专门表格记录。加载至最不利荷载及卸载后应对结构裂缝进行全面检查,尤其应仔细检查是否产生新的裂缝,并将最后检查情况填入裂缝观测记录表,必要时可将裂缝发展情况绘制在裂缝展开图上。

## (二) 加载实施与控制

### 1. 加载程序

加载应在指挥人员指挥下严格按计划程序进行。采用重物加载时按荷载分级逐级施加,每级荷载堆放位置准确、整齐稳定。荷载施加完毕后,逐级卸载。采用车辆加载时,先由零载加至第一级荷载,卸载至零载,再由零载加至第二级荷载,卸至零载……,直至所有荷载施加完毕(有时为了确保试验结果准无误,每一级荷载重复施加 1~2 次)每一级荷载施加次序为纵向先施加重车,后施加两侧标准车;横向先施加桥中心的车辆,后施加外测的车辆。

### 2. 加载稳定时间控制

为控制加卸载稳定时间,应选择一个控制观测点(如简支梁的跨中挠度或应变测点)在每级加载(或卸载)后立即测读一次,计算其与加载前(或卸载前)测读值之差值  $S_g$ ,然后每隔 2min 测读一次,计算 2min 前后读数的差值  $\Delta S$ ,并按下式计算相对读数差值  $m$ :

$$m = \frac{\Delta S}{S_g}$$

当  $m$  值小于 1% 或小于量测仪器的最小分辨率时即认为结构基本稳定,可进行各观测点读数。但当进行主要控制截面最大内力荷载工况加载程序时荷载在桥上稳定时间应不少于 5min,对尚未投入营运的新桥应适当延长加载稳定时间。

某些桥梁,如拱桥,有时当拱上建筑或桥面系参与主要承重构件的受力,因连接较弱或变形缓慢,造成测点观测值稳定时间较长,如结构的实测变位(或应变)值远小于计算值,可将加载稳定时间定为 20~30min。

### 3. 加载过程的观察

加载试验过程应对结构控制点位移(或应变)、结构整体行为和薄弱部位破损实行监

控,并将结果随时汇报给指挥人员作为控制加载的依据。随时将控制点位移与计算结果比较,如实测值超过计算值较多,则应暂停加载,待查明原因再决定是否继续加载。试验人员如发现其他测点的测值有较大的反常变化也应查找原因,并及时向试验指挥人员报告。加载过程中应指定人员随时观察结构各部位可能产生的新裂缝,注意观察:构件薄弱部位是否有开裂、破损,组合构件的结合面是否有开裂错位,支座附近混凝土是否开裂,横隔板的接头是否拉裂,结构是否产生不正常的响声,加载时墩台是否发生摇晃现象等等。如发生这些情况应报告试验指挥人员,以便采取相应的措施。

#### 4. 终止加载控制条件

发生下列情况应中途终止加载:

- (1)控制测点应力值已达到或超过用弹性理论按规范安全条件反算的控制应力值时;
- (2)控制测点变位(或挠度)超过规范允许值时;
- (3)由于加载,使结构裂缝的长度、缝宽急剧增加,新裂缝大量出现,缝宽超过允许值的裂缝大量增多,对结构使用寿命造成较大的影响时;
- (4)拱桥加载时沿跨长方向的实测挠度曲线分布规律与计算值相差过大或实测挠度超过计算值过多时;
- (5)发生其他损坏,影响桥梁承载能力或正常使用时。

### 五、试验数据分析及桥梁承载力评定

通过静载试验得到的原始数据、文字和图像描述材料是荷载试验最重要的资料。虽然它们是可靠的。但这些原始资料数量庞大,不直观,不能直接用于评定承载能力,故进行承载力评定之前必须对它进行处理分析,得出直接进行承载力评定的指标,以满足承载力评定的需要。

#### (一)试验数据分析

##### 1. 试验资料的修正

##### (1)测值修正

根据各类仪表的标定结果进行测试数据的修正,如考虑机械式仪表校正系数、电测仪表率定系数、灵敏系数、电阻应变观测的导线电阻影响等等。当这类因素对测值的影响小于1%时可不予修正。

##### (2)温度影响修正

温度对测试的影响比较复杂。结构构件的各部位不同的温度变化、结构的受力特性、测试仪表或元件的温度变化、电测元件的温度敏感性、自补性等等均对测试精度造成

一定的影响。逐项分析这些影响是困难的。一般可采用综合分析的方法来进行温度影响修正,即利用加载试验前进行的温度稳定观测数据,建立温度变化(测点处构件表面温度或空气温度)和测点测值(应变和挠度)变化的线性关系,然后按下式进行温度修正计算:

$$S = S' - \Delta t \cdot K_t$$

- 式中  $S$ ——温度修正后的测点加载测值变化;  
 $S'$ ——温度修正前的测点加载测值变化;  
 $\Delta t$ ——相应于  $S'$  观测时间段内的温度变化(°C)  
 $K_t$ ——空载时温度上升 1°C 时测点测值变化量。

$$K_t = \frac{\Delta S}{\Delta t_1}$$

- 式中  $\Delta S$ ——空载时某一时间区段内测点测值变化量;  
 $\Delta t_1$ ——相应于  $\Delta S$  同一时间区段内温度变化量。

温度变化量的观测对应变宜采用构件表面温度,对挠度宜采用气温。温度修正系数  $K_t$  应采用多次观测的平均值,如测值变化与温度变化关系不明显时则不能采用。

由于温度影响修正比较困难,一般不进行这项工作,而采取缩短加载时间、选择温度稳定性较好的时间进行试验等办法尽量减小温度对测试精度的影响。

### (3) 支点沉降影响的修正

当支点沉降量较大时,应修正其对挠度值的影响,修正量  $C$  可按下式计算:

$$C = \frac{l-x}{l}a + \frac{x}{l}b$$

- 式中  $C$ ——测点的支点沉降影响修正量;  
 $l$ —— $A$  支点到  $B$  支点的距离;  
 $x$ ——挠度测点到  $A$  支点的距离;  
 $a$ —— $A$  支点沉降量;  
 $b$ —— $B$  支点沉降量。

### 2. 各测点变位(挠度、位移、沉降)与应变的计算

根据量测数据作下列计算

总变位(或总应变)  $S_t = S_1 - S_i$

弹性变位(或弹性应变)  $S_e = S_1 - S_u$

残余变位(或残余应变)  $S_p = S_t - S_e = S_u - S_i$

- 式中  $S_i$ ——加载前测值;  
 $S_1$ ——加载达到稳定时测值;

$S_u$ ——卸载后达到稳定时测值。

引入相对残余变位(或应变)的概念描述结构整体或局部进入塑性工作状态的程度。相对残余变位(或应变)按下式计算：

$$S'_p = \frac{S_p}{S_t} \times 100\% \quad (5-5-18)$$

式中  $S'_p$ ——相对残余变位(或应变),  $S_p$ 、 $S_t$  意义同前。

### 3. 应力计算

根据测量到的测点应变,当结构处于线弹性工作状态时可以利用应力应变关系计算测点的应力。

#### (1) 单向应力状态

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5-5-19)$$

#### (2) 平面应力状态

① 当主应力方向已知时：

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \quad (5-5-20)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1) \quad (5-5-21)$$

式中  $E$ ——构件材料弹性模量；

$\nu$ ——构件材料泊松比；

$\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$ ——方向相互垂直的主应变；

$\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ ——方向相互垂直的主应力。

② 主应力方向未知时需用应变花测量其应变计算主应力。为花的常见形式为直角形或等边形(图 5-5-25a) b),由三个应变片组成;也可以增加校核片布置为扇形和伞形(图 5-5-25d) e)。采用图 5-5-25 中的五种应变花时测点主应力可以表示为

$$\sigma_1 = \left(\frac{E}{1-\nu}\right)A + \left(\frac{E}{1+\nu}\right)\sqrt{B^2 + C^2} \quad (5-5-22)$$

$$\sigma_2 = \left(\frac{E}{1-\nu}\right)A - \left(\frac{E}{1+\nu}\right)\sqrt{B^2 + C^2} \quad (5-5-23)$$

$$\tau_{\max} = \left(\frac{E}{1+\nu}\right)\sqrt{B^2 + C^2} \quad (5-5-24)$$

$$\psi_0 = \frac{1}{2} \operatorname{tg}^{-1} \frac{C}{B} \quad (5-5-25)$$

其中参数  $A$ 、 $B$ 、 $C$  由应变花的形式而定,上面五种形式应变花的参数见表 5-5-

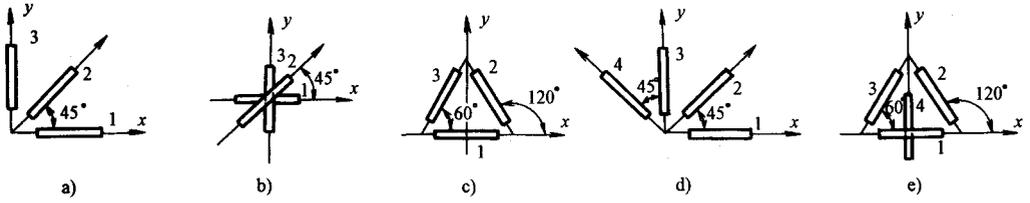


图 5-5-25 常用应变花的形式

a)直角形 b)直角交叉形 c)等边三角形 d)扇形 e)伞形；

表 5-5-24 应变花参数

测量平面上一点主应变时应变计的布置		A	B	C
应变花名称	应变花形式			
45°直角应变花	图 5-5-25a)	$\frac{\epsilon_0 + \epsilon_{90}}{2}$	$\frac{\epsilon_0 - \epsilon_{90}}{2}$	$\frac{2\epsilon_{45} - \epsilon_0 - \epsilon_{90}}{2}$
60°等边三角形应变花	图 5-5-25c)	$\frac{\epsilon_0 + \epsilon_{60} + \epsilon_{120}}{3}$	$\epsilon_0 - \frac{\epsilon_0 + \epsilon_{60} + \epsilon_{120}}{3}$	$\frac{\epsilon_{60} - \epsilon_{120}}{\sqrt{3}}$
伞型应变花	图 5-5-25e)	$\frac{\epsilon_0 + \epsilon_{90}}{2}$	$\frac{\epsilon_0 - \epsilon_{90}}{2}$	$\frac{\epsilon_{60} - \epsilon_{120}}{\sqrt{3}}$
扇型应变花	图 5-5-25d)	$\frac{\epsilon_0 + \epsilon_{45} + \epsilon_{90} + \epsilon_{135}}{4}$	$\frac{1}{2}(\epsilon_0 - \epsilon_{90})$	$\frac{1}{2}(\epsilon_{135} - \epsilon_{45})$

#### 4. 试验结果与理论分析的比较

为了评定结构整体受力性能,需对桥梁荷载试验结果与理论分析值比较,以检验新建桥是否达到设计要求的荷载标准,或判断旧桥的承载能力。比较时可以将结构位移、应变等试验值与理论计算值列表进行比较,对结构在最不利荷载工况作用下主要控制测点的位移、应力的实测值与理论分析值,要分别绘出荷载位移( $P-\Delta$ )曲线,荷载应力( $P-\sigma$ )曲线,并绘出最不利荷载工况作用下位移沿结构(纵、横向)分布曲线和控截面应变(沿高度)分布图,绘制结构裂缝分布图(对裂缝编号注明长度、宽度、初裂荷载以及裂缝发展情况)。为了量化,以及描述试验值与理论分析值比较的结果,此处引入结构校验系数:

$$\eta = \frac{S_e}{S_s} \quad (5-5-26)$$

式中  $S_e$ ——试验荷载作用下量测的弹性变位(或应变)值;

$S_s$ ——试验荷载作用下的理论计算变位(或应变)值。

$S_e$ 与  $S_s$ 的比较可用实测的横截面平均值与计算值比较,也可考虑荷载横向不均匀分布而选用实测最大值与考虑横向增大系数的计算值进行比较。横向增大系数最好采

用实测值,如无实测值也可采用理论计算值。

## (二) 荷载试验成果分析与承载能力评定

经过荷载试验的桥梁,应根据整理的试验资料分析结构的工作状况,进一步评定桥梁承载能力,为新建桥验收做出鉴定结论,或作为旧桥承载力鉴定检算的依据,并纳入桥梁承载能力鉴定报告和桥梁承载能力鉴定表。一般进行下列分析评定工作。

### 1. 结构工作状况

#### (1) 校验系数 $\eta$

校验系数  $\eta$  是评定结构工作状况、确定桥梁承载能力的一个重要指标。不同结构形式的桥梁其  $\eta$  值常不相同, $\eta$  值常见的范围可参考表 5-5-25。一般要求, $\eta$  值不大于 1。 $\eta$  值越小结构的安全储备越大。 $\eta$  值过大或过小都应该从多方面分析原因。如  $\eta$  值过大可能说明组成结构的材料强度较低,结构各部分联结性较差,刚度较低等等。 $\eta$  值过小可能说明材料的实际强度及弹性模量较高,梁桥的混凝土桥面铺装及人行道等与主梁共同受力,拱桥拱上建筑与拱圈共同作用,支座摩阻力对结构受力的有利影响,计算理论或简化的计算式偏于安全等等。试验加载物的称量误差、仪表的观测误差等也对  $\eta$  值有一定影响。

表 5-5-25 桥梁校验系数常值表

桥梁类型	应变(或应力)校验系数	挠度校验系数	桥梁类型	应变(或应力)校验系数	挠度校验系数
钢筋混凝土板桥	0.20~0.40	0.20~0.50	预应力混凝土桥	0.60~0.90	0.70~1.00
钢筋混凝土梁桥	0.40~0.80	0.50~0.90	圬工拱桥	0.70~1.00	0.80~1.00

#### (2) 实测值与理论值的关系曲线

由于理论的变位(或应变)一般系按线性关系计算,所以如测点实测弹性变位(或应变)与理论计算值成正比,其关系曲线接近于直线,说明结构处于良好的弹性工作状况。

#### (3) 相对残余变位(或应变)

测点在控制荷载工况作用下的相对残余变位(或应变)  $S_p/S_t$  越小说明结构越接近弹性工作状况。一般要求  $S_p/S_t$  值不大于 20%,当  $S_p/S_t$  大于 20% 时,应查明原因。如确系桥梁强度不足,应在评定时,酌情降低桥梁的承载能力。

#### (4) 动载性能

当动载试验效率  $\eta_d$  接近 1 时,不同车速下实测的冲击系数最大值可用于结构的强度及稳定性检算。

结构的自振频率、活载强迫振动频率及阻尼系数等对桥梁承载能力的影响可参考其他有关资料进行分析。

### 2. 结构的强度及稳定性

当荷载试验项目经较全面时,可采用荷载试验主要挠度测点的校验系数  $\eta$  来评定结构的强度和稳定性。检算时用荷载试验后的梁桥检算系数  $Z_2$  代替《公路旧桥承载能力鉴定方法》中旧桥检算系数  $Z_1$ ,对桥梁结构抗力效应予以提高或折减。

砖石和混凝土桥

$$S_d(\gamma_{s0} \Psi \sum \gamma_{s1} Q) \leq R_d(\frac{R_i}{\gamma_m}, a_k) \times Z_2 \quad (5-5-27)$$

钢筋混凝土及预应力混凝土桥

$$S_d(\gamma_g G; \gamma_q \sum Q) \leq \gamma_b R_d(\frac{R_c}{\gamma_c}; \frac{R_s}{\gamma_s}) \times Z_2 \quad (5-5-28)$$

根据  $\eta$  值由表 5-5-26 查取  $Z_2$  的取值范围,再根据下列条件确定  $Z_2$  值。符合下列条件时, $Z_2$  值可取高限,否则应酌减,直至取低限。

- (1) 加载内力与总内力(加载内力 + 恒载内力)的比值较大,荷载试验效果较好。
- (2) 实测值与理论值线性关系较好,相对残余变位(或应变)较小。

表 5-5-26 经过荷载试验的桥梁检算系数  $Z_2$  值表

$\eta$	$Z_2$	$\eta$	$Z_2$
0.4 及以下	1.20 ~ 1.30	0.8	1.00 ~ 1.10
0.5	1.15 ~ 1.25	0.9	0.97 ~ 1.07
0.6	1.10 ~ 1.20	1.0	0.95 ~ 1.05
0.7	1.05 ~ 1.15		

- 注:1.  $\eta$  值应经校核确保计算及实测无误;
- 2.  $\eta$  值在表列之间时可内插;
- 3. 当  $\eta$  值大于 1 时应查明原因,如确系结构本身强度不够,应适当降低检算承载能力。

- (3) 桥梁结构各部份无损伤,风化、锈蚀、裂缝等较轻微。

$\eta$  值应取控制截面内力最不利荷载工况时最大挠度测点进行计算。对梁桥可采用跨中最大正弯矩荷载工况的跨中挠度;对拱桥检算拱顶截面时可采用拱顶最大正弯矩荷载工况时跨中挠度;检算拱脚截面时可采用拱脚最大负弯矩荷载工况时  $l/4$  截面处挠度;检算  $l/4$  截面时则可用上者平均值;如已安排  $l/4$  截面最大正、负弯矩荷载工况,则可采用该程序时  $l/4$  截面挠度。但拱桥在采用  $\eta$  值根据表 5-5-26 进行检算时,应不再另行考虑拱上建筑联合作用。

对于旧桥采用  $Z_1$  值根据《公路旧桥承载能力鉴定方法》检算不符合要求,但采用  $Z_2$  值根据 5-5-27 求 5-5-28 检算符合要求时,可评定桥梁承载能力满足检算荷载要求。

3. 地基与基础

当试验荷载作用下墩台沉降、水平位移及倾角较小,符合上部结构检算要求,卸载后

变位基本回复时,认为地基与基础在检算荷载作用下能正常工作。

当试验荷载作用下墩台沉降、水平位移、倾角较大或不稳定,卸载后变位不能回复时,应进一步对地基、基础进行探查、检算,必要时应对地基基础进行加固处理。

#### 4. 结构的刚度要求

试验荷载作用下,主要测点挠度校验系数  $\eta$  应不大于 1。各点的挠度不超过“桥规”(JTJ 022—85 第 4.2.13 条和 JTJ 023—85 第 4.2.3 条)规定的允许值。即

圬土拱桥:一个桥范围内正负挠度的最大绝对值之和不小于  $L/1000$ ,履带车和挂车要验算时提高 20%。

钢筋混凝土桥 梁桥主梁跨中	$L/600$
梁桥主要悬臂端	$L/300$
桁架、拱桥	$L/300$

#### 5. 裂缝

对于新建桥试验荷载作用下预应力结构不应出现裂缝,钢筋混凝土结构裂缝不超过“桥规”容许值:

$$\delta_{\max} \leq [\delta] \quad (5-5-29)$$

对于旧桥试验荷载作用下绝大部分裂缝宽度应不大于表 5-5-27 规定的允许值,荷载试验后所有裂缝应不大于 5-5-27 规定的允许值。

表 5-5-27 裂缝限值表

结构类别	裂缝部位	允许最大缝宽 (mm)	其他要求
钢筋混 凝土梁	主筋附近竖向裂缝	0.25	
	腹板斜向裂缝	0.30	
	组合梁结合面	0.50	不允许贯通结合面
	横隔板与梁体端部	0.30	
	支座垫石	0.50	
预应力混 凝土梁	梁体竖向裂缝	不允许	
	梁体纵向裂缝	0.20	
砖、石、 混凝土拱	拱圈横向	0.30	裂缝高小于截面高一半
	拱圈纵向	0.50	裂缝长小于跨 $\frac{1}{8}$
	拱波与拱肋结合处	0.20	

结构类别	裂缝部位		允许最大缝宽 (mm)	其他要求	
墩台	墩台帽		0.30	不允许贯通墩台身截面一半	
	墩台身	经常受浸蚀性环境水影响	有筋		0.20
			无筋		0.30
		常年有水,但无侵蚀性影响	有筋		0.25
			无筋		0.35
		干沟或季节性有水河流			0.40
	有冻结作用部分		0.20		

注 表中所列除特指外适用于一般条件,对于潮湿和空气中含有较多腐蚀性气体等条件下的缝宽限制应要求严格一些。

通过对桥梁结构工作状况、强度稳定性、刚度和抗裂性各项指标进行综合评定,并结合结构下部评定和动力性能评定,综合给出桥梁承载能力评定结论,将评定结论写入桥梁承载能力鉴定报告。

### (三)静载试验报告编写

全部试验资料整理与分析的基础上,提出桥梁结构静载试验报告。其内容应该包括下列各项:

#### 1. 试验概况

主要内容是简要介绍被试验的桥梁结构的型式、构造特点、施工概况。对于鉴定性试验,还要说明在施工设计中存在的技术问题,以及其对使用的影响等。对于科研性试验,还要说明设计中需要解决的问题。文中要适当附上必要的简图。

#### 2. 试验的目的

根据试验对象的特点,要有针对性地说明结构静载试验所要达到的目的和要求。

#### 3. 试验方案设计

这一部分要说明根据试验目的确定的测试项目和测试的方法、仪器配备、测点布置情况,并附以简图。同时要说明试验荷载的情况,如试验荷载的形成(是标准列车或汽车荷载,还是模拟的等代荷载)以及加载的程序。

#### 4. 试验日期及试验的过程

说明具体组织桥梁静载试验的起讫日期、试验准备的阶段情况、整个试验阶段特殊的问题及其解决办法。

#### 5. 各项试验达到的精度

将本次试验中使用的各种仪器、仪表的类型、精度(最小读数)列表说明,同时还要说明试验中可能使用的夹具对试验精度的影响程度。

#### 6. 试验成果与分析

依据桥梁结构静载试验项目,将理论值、实测值以及有关的参考限值进行对比,说明理论与实践二者的符合程度,从中得出试验结构所具有的实际承载能力、抗裂性以及使用的安全度,以及从试验中所发现的新问题。从现场检查的综合情况,说明试验结构的施工质量。对于一些科研性试验,还要从综合分析中说明设计计算理论的正确性和实用性,以及尚存在未解决的问题。如果材料丰富,很有可能从综合分析中,提出简化计算公式等。

#### 7. 试验记录摘录

将试验中所得的实测的控制数据,以列表或以曲线的形式表达出来。

#### 8. 技术结论

根据综合分析的结果,得出最后的技术结论,对试验结构做出科学的评价,同时根据存在的问题,提出改进设计或者加强维修养护方面的建议。

#### 9. 经验教训

从结构试验的角度,对本次试验的计划、程序、测试方法,提出不足或改进的意见。

#### 10. 有关图表、照片

### 六、结构动载试验

桥梁结构承受车辆、人群、风力和地震等动力荷载作用下产生振动,桥梁在动力荷载作用下的受力分析是桥梁结构分析的又一重要任务。桥梁的振动问题影响因素复杂,仅靠理论分析还不能满足工程应用的需要,需用理论分析与实验测试相结合的方法解决,桥梁动载试验就成为解决该问题必不可少的手段。桥梁的动力特性(频率、振型和阻尼比)是评定桥梁承载力状态的重要参数,随着我国公路桥梁检验评定制度推行,桥梁动载试验会将越来越受到重视。

结构振动问题涉及振源(输入)、结构(系统)和响应(输出),它们的关系为:



在结构振动问题中输入、系统和输出中知其中两者,可以求第三者,所以桥梁的动载试验可以划分为三类基本问题:

1. 测定桥梁荷载的动力特性(数值、方向、频率等)。
2. 测定桥梁结构的动力特性(自振频率、阻尼、振型等)。
3. 测定桥梁在动荷载作用下的响应(动位移、动应力等)。

桥梁的振动试验涉及很宽的范畴,如模拟地震试验、抗风试验、疲劳试验等。本章着重介绍常规桥梁结构动力特性和动载响应的试验与分析。

#### (一)桥梁动载试验的测试仪器

结构振动的测试仪器包括:测振传感器、信号放大器、光线示波器、磁带记录仪和数字信号处理机。近年振动信号分析处理技术发展很快,已开发出多种以  $A/D$  转换和微

机结合的数据采集和分析一体化的智能仪器,可以进行实时数据采集分析,并能实现数据储存,有取代磁带记录仪和专用信号处理机的趋势,但还有待普及。

### 1. 测振传感器

#### (1)基本原理

振动参数有位移、速度和加速度。测量这些振动参数的传感器有许多种类。但由于振动测量的特殊性,如测量时难以在振动体附近找到一个静止点作为测量的基准点,所以就需要使用惯性式测振传感器。通常所指的测振传感器即为惯性式测振传感器(以下简称测振传感器)。测振传感器的基本原理为:由惯性质量、阻尼和弹簧组成一个动力系统,这个动力系统固定在振动体上(即传感器的外壳固定在振动体上),与振动体一起振动。通过测量惯性质量相对于传感器外壳的运动,就可以得到振动体的振动(图 5-5-26)。由于这是一种非直接的测量方法,所以,这个传感器动力系统的动力特性对测量结构具有很重要的影响。

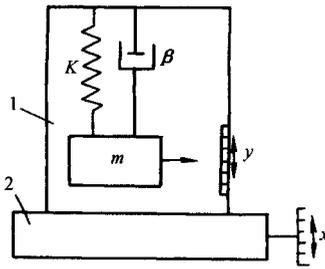


图 5-5-26 测振传感器力学原理

1. 传感器 2. 振动体

设被测振动体的振动规律如下:

$$x = X_0 \sin \omega t \quad (5-5-30)$$

式中  $x$ ——振动体相对固定参考座标的位移;

$X_0$ ——振动体振动的振幅;

$\omega$ ——振动体振动的圆频率。

传感器外壳随振动体一起运动。以  $y$  表示质量块  $m$  相对于传感器外壳的位移,由图 5-5-26 可知,质量块  $m$  的总位移为  $x + y$ ,它的运动方程为

$$m \frac{d^2(x + y)}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = 0 \quad (5-5-31)$$

或

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + c \frac{dy}{dt} + ky = m X_0 \omega^2 \cdot \sin \omega t \quad (5-5-32)$$

上式为一单自由度有阻尼的强迫振动的方程,它的通解为

$$y = Be^{-nt} \cos(\sqrt{\omega^2 - n^2}t + a) + Y_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (5-5-33)$$

其中  $n = \frac{c}{2m}$ 。

上式中第一项为自由振动解,由于阻尼作用而很快衰减,第二项为强迫振动解,其中

$$Y_0 = \frac{X_0 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4\xi^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \quad (5-5-34)$$

$$\varphi = \arctg \frac{2\xi \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \quad (5-5-35)$$

式中  $\xi$ ——阻尼比,  $\xi = \frac{n}{\omega_n}$ ;

$\omega_n$ ——质量弹簧系统的固有频率,  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 。

由式(5-5-33)可知,传感器动力系统的稳态振动如下:

$$y = Y_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (5-5-36)$$

## (2) 传感器的频率特性

将式(5-5-36)与式(5-5-38)相比较,可以看出传感器中的质量块相对外壳的运动规律与振动体的运动规律一致,但两者相差一个相位角  $\varphi$ 。质量块的振幅  $Y_0$  与振动体的振幅  $X_0$  之比为

$$\frac{Y_0}{X_0} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4\xi^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \quad (5-5-37)$$

式(5-5-37)和式(5-5-38)分别为测振传感器的幅频特性和相频特性,相应的曲线称为幅频特性曲线和相频特性曲线(图5-5-27、图5-5-28)。由图5-5-27、图5-5-28可知,当  $\frac{\omega}{\omega_n}$  较大时,即振动体振动频率较之传感器的固有频率大很多时,不管阻

尼比  $\xi$  的大小如何,  $\frac{Y_0}{X_0}$  趋近于 1,  $\varphi$  趋近于  $180^\circ$ , 表示质量块的振幅和振动体的振幅趋近

于相等,而它们的相位趋于相反,这是测振传感器的理想状态。当  $\frac{\omega}{\omega_n}$  接近于 1 时,  $\frac{Y_0}{X_0}$  值

随阻尼值的变化而作很大的变化,这一段的相位差  $\varphi$  随着  $\frac{\omega}{\omega_n}$  的变化而变化,表示仪器测

出的波形有畸变。当  $\frac{\omega}{\omega_n}$  较小趋于零时,  $\frac{Y_0}{X_0}$  值也趋于零, 表示传感器难以反映所要测的振动。所以, 在设计和选择测振传感器时, 应使传感器的固有频率  $\omega_n$  与所测振动的频率  $\omega$  相比尽可能小, 即使  $\frac{\omega}{\omega_n}$  尽可能大。但是, 降低传感器的固有频率有时会有困难, 这时可以适当选择阻尼器的阻尼值来延伸传感器的频率下限。

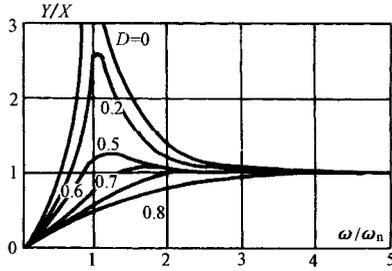


图 5-5-27 幅频特性曲线

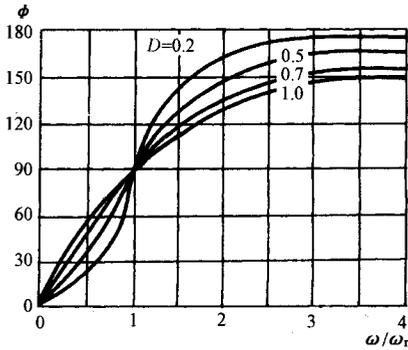


图 5-5-28 相频特性曲线

以上讨论是关于测量位移的传感器, 如果使传感器的固有频率远远大于所测振动的频率, 可以得到关于惯性式加速度传感器的频率特性。当  $\omega_n \gg \omega$  时, 由式(5-5-34)、式(5-5-35)可得:

$$Y_0 = X_0 \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \quad (5-5-38)$$

$$\varphi \approx 0 \quad (5-5-39)$$

所测振动的加速度为:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -X_0 \omega^2 \sin \omega t \quad (5-5-40)$$

令  $a_m = X_0 \omega^2$ , 由式(5-5-39)可知:

$$Y_0 = \frac{1}{\omega_n^2} \cdot a_m \quad (5-5-41)$$

上式表示传感器的位移幅值与被测振动的加速度幅值成正比,这就是惯性式加速度传感器的工作原理。以  $\frac{\omega}{\omega_n}$  为横坐标,以  $Y_0 \frac{\omega_n^2}{a_m}$  为纵坐标,可得加速度传感器的幅频特性曲线(图 5-5-29)。

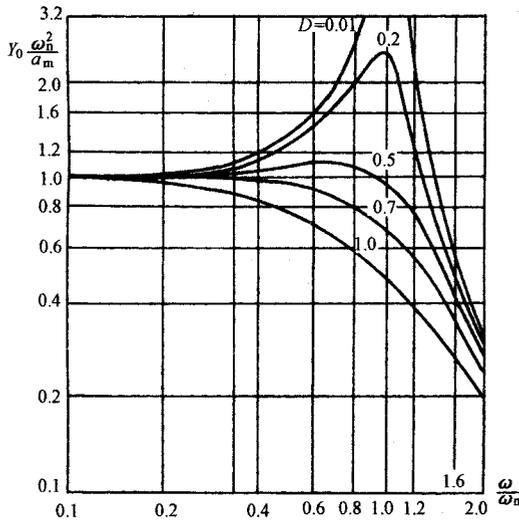


图 5-5-29 加速度传感器的幅频特性曲线

以上介绍的质量、弹簧和阻尼系统是测振传感器的感受部分。感受到振动信号要通过各种转换方式转换成电信号,转换方式有磁电式、压电式、电阻应变式等。传感器所测的振动量通常是以位移、速度和加速度等,按它们的转换方式和所测振动量可以分成很多种类。以下简要介绍磁电式速度传感器和压电式加速度传感器。

### (3) 磁电式速度传感器。

磁电式速度传感器是根据电磁感应的原理制成的,其特点是灵敏度高,性能稳定,输出阻抗低,频率响应范围有一定宽度。调整质量、弹簧和阻尼系统的动力参数,可以使传感器既能测量非常微弱的振动,也能测比较强的振动。

图 5-5-30 为一磁电式速度传感器,其中磁钢和壳体相固连,并通过壳体安装在振动体上,与振动体一起振动,芯轴和线圈组成传感器的系统质量,通过弹簧片(系统弹簧)与壳体连动。振动体振动时,系统质量与传感器壳体之间发生相对位移,因此线圈与磁钢之间也发生相对运动。根据电磁感应定律,感应电动势  $E$  的大小为

$$E = Blv \quad (5-5-42)$$

式中  $B$ ——线圈所在磁钢间隙的磁感应强度;

$l$ ——每匝线圈的平均长度；

$n$ ——线圈匝数；

$v$ ——线圈相对于磁钢的运动速度，即系统质量相对于传感器壳体的运动速度。

从上式可以看出，对于传感器来说  $Blv$  是常量，所以传感器的电压输出（即感应电动势  $E$ ）与相对运动速度  $v$  成正比。

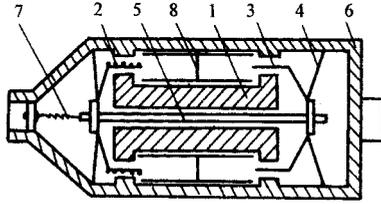


图 5-5-30 磁电式速度传感器

1—磁钢 2—线圈 3—阻尼环 4—弹簧片 5—芯轴 6—外壳 7—输出线 8—铝架

图 5-5-31 为一摆式测振传感器，它的质量弹簧系统设计成转动的形式，因而可以获得更低的仪器固有频率。摆式传感器可以测垂直方向和水平方向的振动；它也是磁电式传感器，输出电压与相对运动速度成正比。

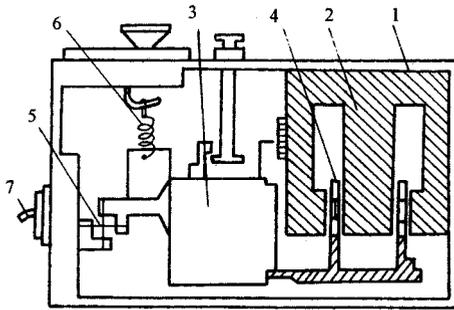


图 5-5-31 摆式传感器

1—外壳 2—磁钢 3—重锤 4—线圈 5—十字簧片 6—弹簧 7—输出线

磁电式测振传感器的主要技术指标如下。

①传感器质量弹簧系统的固有频率 它直接影响传感器的频率响应。固有频率取决于质量的大小和弹簧的刚度。

②灵敏度 即传感器在测振方向受到一个单位振动速度时的输出电压；

③频率响应 当所测振动的频率变化时，传感器的灵敏度、输出的相位差等也随之变化，这个变化的规律称为传感器的频率响应。对于一个阻尼值，只有一条频率响应曲线。

④ 阻尼 传感器的阻尼与频率响应有很大关系,磁电式测振传感器的阻尼比通常设计成  $0.5 \sim 0.7$ 。

磁电式传感器输出的电压信号一般比较微弱,需要用电压放大器进行放大。

#### (4) 压电式加速度传感器

从物理学知道,一些晶体材料当受到压力并产生机械变形时,在其相应的两个表面上出现异号电荷,当外力去掉后,晶体又重新回到不带电的状态,这种现象称为压电效应。压电式加速度传感器是利用晶体的压电效应而制成的,其特点是稳定性高、机械强度高及能在很宽的温度范围内使用,但灵敏度较低。

图 5-5-32 为压电式加速度传感器的结构原理,压电晶体片上是质量块,用硬弹簧将它们夹紧在基座上。质量弹簧系统的弹簧刚度由硬弹簧的刚度和晶体片的刚度组成,刚度很大,质量块的质量较小,因而质量弹簧系统的固有频率很高,可达数千赫兹,高的甚至可达  $100 \sim 200\text{kHz}$ 。

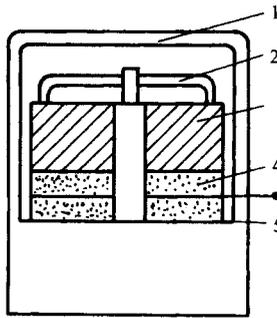


图 5-5-32 加速度传感器的结构原理

1—外壳 2—硬弹簧 3—质量块 4—压电晶体 5—输出端

由前面的分析可知,当传感器的固有频率远远大于所测振动的频率时,质量块相对于外壳的位移就反映所测振动的加速度。质量块相对于外壳的位移乘上晶体的刚度就是作用在晶体上的动压力。这个动压力与压电晶体两个表面所产生的电荷量(或电压)成正比,因此我们可以通过测量压电晶体的电荷量来得到所测振动的加速度。

压电式加速度传感器的主要技术指标如下。

① 灵敏度 压电式加速度传感器有两种形式的灵敏度,电荷灵敏度  $S_q$  ( $S_q$  的单位是  $\text{pC/g}$ ,  $\text{pC}$  是微微库仑,  $g$  是重力加速度)和电压灵敏度  $S_v$  ( $S_v$  的单位通常是  $\text{mV/g}$ )。传感器灵敏度的大小取决于压电晶体材料的特性和质量块的质量大小。传感器几何尺寸愈大亦即质量块愈大,灵敏度愈大,但使用频率愈窄;传感器体积减小亦即质量块减小,灵敏度也减小,但使用频率范围加宽。选择压电式加速度传感器,要根据测试要求综合考虑。

②安装谐振频率  $f_{安}$   $f_{安}$  是指传感器牢固地(用钢螺栓)装在一个有限质量  $m$ (目前国际上公认的标准是取体积为 1 立方英寸,质量为 180g)的物体上的谐振频率。压电式加速度传感器本身有一个固有谐振频率,但是传感器总是要通过一定的方式安装在振动体上,这样谐振频率就要受安装条件的影响。传感器的安装谐振频率与传感器的频率响应有密切关系,不好的安装方法会大大影响测试的质量。

③频率响应 根据对测试精度的要求,通常取传感器安装谐振频率的  $\frac{1}{5} \sim \frac{1}{10}$  为测量频率的上限,测量频率的下限可以很低,所以压电式加速度传感器的工作频率很宽。

④横向灵敏度比 即传感器受到垂直于主轴方向振动时的灵敏度与沿主轴方向振动的灵敏度之比。在理想的情况下,传感器的横向灵敏度比应等于零,即当与主轴垂直方向振动时不应有信号输出。

⑤幅值范围 即传感器灵敏度保持在一定误差大小(通常在 5% ~ 10%)时的输入加速度幅值的范围,也就是传感器保持线性的最大可测范围。

压电式加速度传感器用的放大器有电压放大器和电荷放大器两种。

## 2. 光线示波器

光线示波器也是一种常用的模拟式记录器,主要用于振动测量的数据记录,它将电信号转换为光信号并记录在感光纸或胶片上,得到的是试验变量与时间的关系曲线。

图 5-5-33 为光线示波器的工作原理,当振动的信号电流输入振动子线圈 2 时,在固定磁场 3 内的振动子线圈就发生偏转,与线圈连着的小镜片 4 也随之偏转,偏转的角度大小和方向与输入的信号电流相对应,光线射在前进着的感光记录纸上即留下所测信号的波形,与此同时在感光记录纸上用频闪灯 8 打上时间标记。光线示波器可以同时记录若干条波形曲线,它还可以用于静力试验的数据记录。

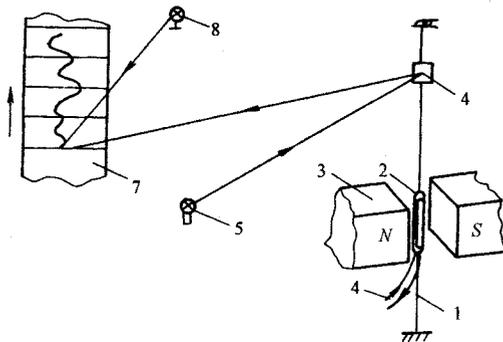


图 5-5-33 光线示波器的工作原理

1—张丝 2—线圈 3—磁场 4—镜片 5—光源 6—输入线 7—记录纸 8—频闪灯

对光线示波器记录的试验结果进行数据处理,与  $X-Y$  记录仪相同,要用尺直接在曲线上量取大小,根据标定值按比例换算得到代表试验结果的数值;关于时间的数值,可用记录纸上的时间标记按同样方法进行换算。

### 3. 磁带记录仪

磁带记录仪是一种常用的较理想的记录器,可以用于振动测量和静力试验的数据记录,它将电信号转换成磁信号并记录在磁带上,得到的是试验变量与时间的变化关系。

磁带记录仪由磁带、磁头、磁带传动机构、放大器和调制器等组成,它的原理见图 5-5-34。记录时,从传感器来的信号输入到磁带记录仪,经过放大器和调制器的处理,通过记录磁头把电信号转换成磁信号,记录在以规定速度作匀速运动的磁带上。重放时,使记录有信号的磁带按原来记录时的速度(也可以改变速度)作匀速运动,通过重放磁头从磁带“读出”磁信号,并转换成电信号,经过放大器和调制器的处理,输出给其他仪器。

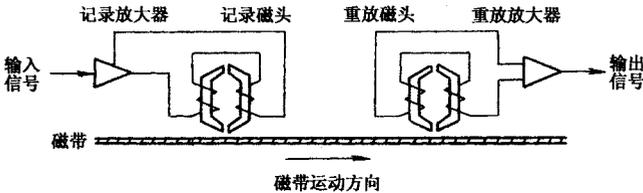


图 5-5-34 直接记录式磁带记录仪原理图

磁带记录仪的记录方式有模拟式和数字式两种,对记录数据进行处理应采用不同的方法。用模拟式记录的数据,可通过重放,把信号输送给  $X-Y$  记录仪或光线示波器等,用前面所提到的方法,得到相应的数值。或者,可把信号输送给其他分析仪器,用  $A/D$  转换,得到相应的数值。用数字式记录仪记录的数据,可直接输送给打印机打印输出,或输送到计算机等。

磁带记录仪的特点是:①工作频带宽,可以记录从直流到  $2\text{MHz}$  ( $\text{DC}-2\text{MHz}$ ) 的信号;②可以同时进行多道记录,并能保持多通道信号之间正确的时间和相位关系;③可以快速记录慢速重放,或慢速记录快速重放,使数据记录和分析更加方便;④通过重放,可以很方便地将磁信号还原成电信号,输送给各种分析仪器。

### 4. 信号处理机

动态信号数据处理,一般在专用信号处理机或利用数据处理软件在通用计算机上进行。目前数字信号处理技术发展很快,它以 FFT 硬件和专用软件为基础,可以在幅值域、时域、频域对各种类型的信号进行处理。图 5-5-35 给出一般信号处理机的组成图。输入信号首先通过低通抗混淆滤波器和前置放大器,然后经过模数转换器,将模拟电量信号转换成数字信号输入给计算机,在数据处理硬件和软件支持下进行各种数据处理,

最后将分机结果显示在屏幕上或通过打印机(绘图仪)打印出来。功能较全的数据处理机还应配备磁盘驱动器、输入和输入接口,及不同算法语言编制的专用程序。信号分析处理已是一门独立的学科专业,广泛用于振动分析、通讯、气象、医疗等行业。信号处理机的规格型号也很多,如 HP3562A、BK2034、7T18S、CF—500,一般数据处理机由专人操作使用,进行桥梁动态信号分析时,可以根据条件和需要选用,这里就不一一介绍。

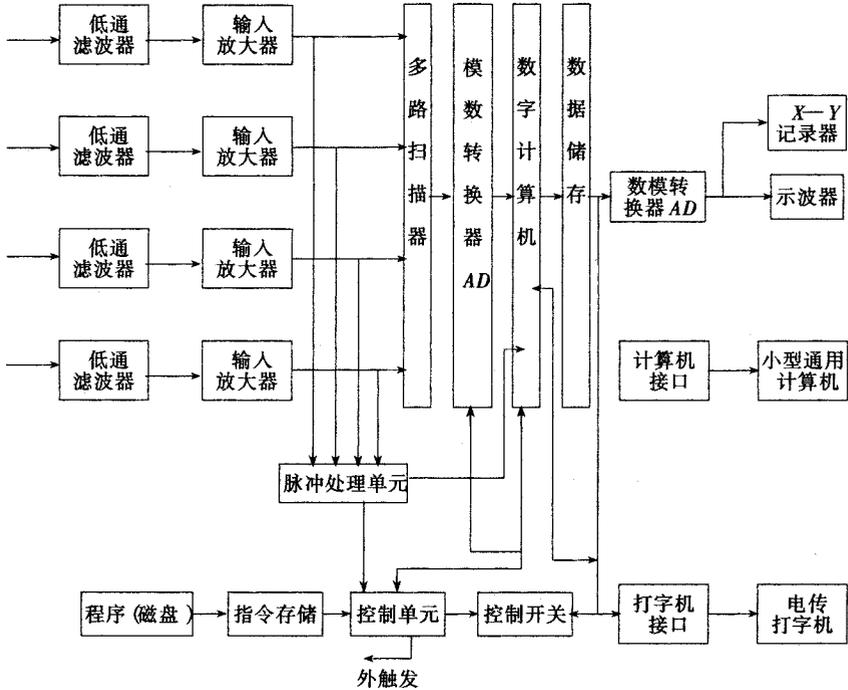


图 5-5-35 数字信号处理机的组成

### 5. 测试系统的选配

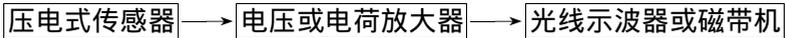
根据常用的一些测振仪器的性能,一般可构成电磁式测试系统、压电式测试系统和电阻应变式测试系统等三种测试系统。

电磁式测试系统在桥梁的动力测试中应用较为普遍,这类系统通过仪器的组合变换可测位移、速度和加速度。电磁式测试系统的特点是输出信号强、灵敏度高、稳定性好、传感器输出阻抗低、长导线的影响较小,因此抗干扰性能好。系统的组成为:

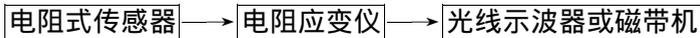


压电式测试系统一般用于测量加速度。由于压电式传感器具有高输出阻抗的特性,要求与输入阻抗很高的放大器相连。因此,放大器输入阻抗的大小将对测试系统的特性产生重大影响。由于压电式传感器自振频率较高,因此可测频响较宽。但系统抗干扰性

差。长导线对阻抗影响较大,易受电磁场干扰。配套的前置放大器有两种基本形式:一种是电压放大器,它的输出电压正比于输入电压;另一种是电荷放大器,它的输出电压正比于压电传感器输出电荷。这两种前置放大器各具特点,电压放大器的输出电压受输出电缆长度的影响,低频特性也受其它输出电阻的影响,由这种放大器组配的系统适用于一般频率范围的动力测试。而电荷放大器不受传输电缆分布电容的影响,低频特性也很少受输入电阻的影响,使用频率可达到零,它适用低频或超低频长距离的动力测试。系统的组成为:



电阻应变式测试系统中传感器的种类较多,例如应变计、位移计、加速度计等,需配套使用的放大器是各类动态电阻应变仪,记录装置为常用的光线振子示波器或磁带机等。这类测试系统的低频响应好,可从零赫兹开始。动态电阻应变仪可作为各类电阻应变式传感器的放大器,但这类测试系统易受温度的影响,抗干扰性能较差,长导线对灵敏度也有影响。电阻应变式测试系统中各部分仪器具有通用性强、应用方便等特点,在桥梁动力试验中的应用是很普遍的。系统的组成为:



在选配上述三类测试系统时,要注意选择测振仪器的技术指标,使传感器、放大器和记录仪器的灵敏度、动态范围、频率响应和幅值范围等技术指标合理配套,以保证测试结果的准确性和可靠性。

## (二) 桥梁动载试验的激振方法

在进行桥梁动载试验时,首先要设法使桥梁产生一定的振动,然后应用测振仪器加以测试和记录,通过对记录的振动信号分析得到桥梁的动力特性和响应。可用于桥梁动载试验的激振方法很多,应根据被测桥梁的结构型式和刚度大小选择激振效果好、易于实施的方法。

### 1. 自振法(瞬态激振法)

自振法的特点是使桥梁产生有阻尼的自由衰减振动,记录到的振动图形是桥梁的衰减振动曲线。为使桥梁产生自由振动,一般常用突加载荷和突卸荷载两种方法。

#### ① 突加载荷法(冲击法)

在被测结构上急速地施加一个冲击作用力,由于施加冲击作用的时间短促,因此,施加于结构的作用实际上是一个冲击脉冲作用。由振动理论可知,冲击脉中的动能传递到结构振动系统的时间,要小于振动系统的自振周期,并且冲击脉中一般都包含了从零到无限大的所有频率的能量,它的频谱是连续谱,只有被测结构的固有频率与之相同或很接近时,冲击脉冲的频率分量才对结构起作用,从而激起结构以其固有频率作自由振动。

对于中、小型桥梁结构,可用落锤激振器(或枕木)垂直地冲击桥梁,激起桥梁竖直方向的自由振动。如果水平方向冲击桥面缘石,则可激起横向振动。图 5-5-36 为公路界常用的落锤激振器的构造图。

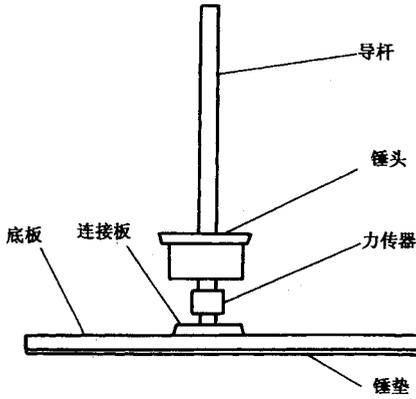


图 5-5-36 落锤激振器构造图

工程界常利用试验车辆在桥面上驶越三角垫木,利用车轮的突然下落对桥梁产生冲击作用,激起桥梁的竖向振动。但此时所测得的结构固有频率包括了试验车辆这一附加质量的影响。图 5-5-37 为试验用解放载重汽车后轮在跨度为 25m 预应力混凝土简支梁桥的跨中位置越过 15cm 高三角垫木后,激起桥跨结构的振动波形记录。

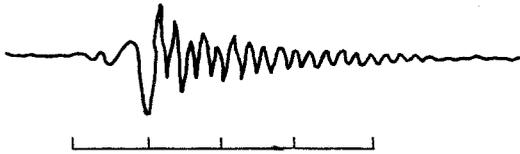


图 5-5-37 跳车引起的结构振动图形

近年来,在桥梁的动载试验中,还采用了爆炸和发射小型火箭产生脉冲荷载等办法来进行激振,但还不普及。采用突加荷载法时,应注意冲击荷载的大小及其作用位置。如果要激起结构的整体振动,则必须在桥梁的主要受力构件上施加足够的冲击力,冲击荷载的位置可按所测结构的振型来确定,如为了获得简支梁桥的第一振型,则冲击荷载作用于跨中部位,测第二振型时冲击荷载应加于跨度的四分之一处。

冲击法引起的自由振动,一般可记录到第一固有频率的振动图形。如用磁带记录仪录取结构某处之响应,通过频谱分析,则可获得多阶固有频率的参数。

②突然卸载法(位移激振法)

采用突然卸载法时,在结构上预先施加一个荷载作用,使结构产生一个初位移,然后突然卸去荷载,利用结构的弹性性质使其产生自由振动。图 5-5-38 示出卸载法的激振装置。

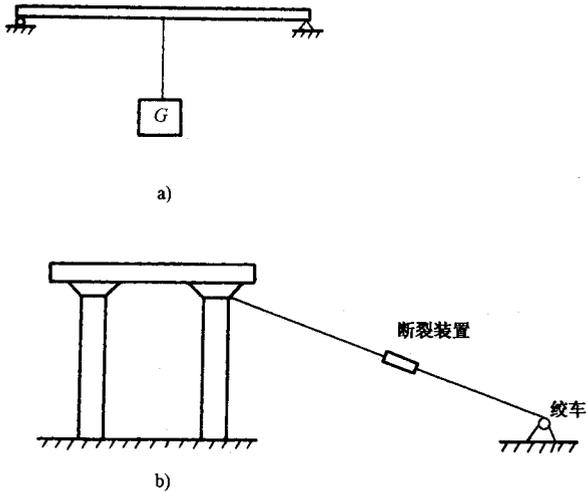


图 5-5-38 卸载法试验装置

为卸落荷载,可通过自动脱钩装置或剪绳索等方法,有时也专门设计一种断裂装置,当预施加力达到一定的数值时,在绳索中间的断裂装置便突然脱离,从而激发结构的振动。突卸荷载的大小要根据所需最大振幅计算求出。

## 2. 共振法(强迫振动法)

激振设备有机械式激振器、电磁式激振器和电气液压式振动台。

共振法是利用激振器,对结构施加激振力,使结构产生强迫振动,改变激振力的频率而使结构产生共振现象并借助共振现象来确定结构的动力特性。

激振器在结构上安装位置和激振方向要根据试验的要求和目的而定。使用时,激振器应牢固地固定于结构上,由底座将激振器产生的交变激振力传给结构。如果将两台激振器安放于结构的适当位置上,反向激振,则可进行扭转振动试验。

连续改变激振器的频率,当激振力的频率与结构的固有频率相等时,结构出现共振现象,此时,所记录到的频率即为结构的固有频率。

对于较复杂的结构,有时需要知道基频以后的几个频率。此时可以连续改变激振力的频率,进行“频率扫描”,使结构连续出现第一次共振,第二次共振,……等等,同时记录结构的振动图形。由此可得到结构的第一频率(基频)、第二频率、……等,在此基础上,再在共振频率附近进行稳定的激振试验,则可准确地测定结构的固有频率与振型。图 5-5-39 为进行频率扫描时的记录曲线。

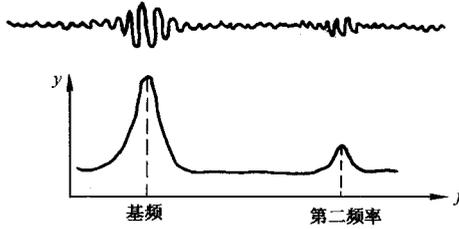


图 5-5-39 频率扫描时结构的振动图

在上述频率扫描试验时,同时记录结构的振幅变化情况,则可作出共振曲线,即频率—振幅关系曲线,从而确定结构的阻尼特性。

对于自振频率较低的大跨度柔性桥梁结构,也可利用人群在桥面上作有规律的运动,使结构发生共振现象。

在桥梁的动载试验中,常用载重车队由低到高的不同速度驶过桥梁,使结构产生不同程度的强迫振动。在若干次运行车辆荷载试验中,当某一行驶速度产生的激振力的频率与结构的固有频率相接近时,结构便产生共振现象,此时结构各部位的振动响应达最大值。在车辆驶离桥跨以后,结构作自由衰减振动,这时可由记录到的波形曲线分析得出结构的动力特性。图 5-5-40 为车速 21km/h,驶过 25m 预应力混凝土简支梁桥时,跨中挠度的时历曲线。振动波形曲线中 A、B 一段,是车辆离桥后,结构作自由衰减振动的波形记录,从中可分析计算出结构的固有频率和阻尼特性。

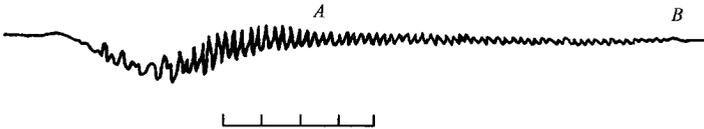


图 5-5-40 车速为 21km/h 时跨中挠度时历曲线

### 3. 脉动法

对于大跨度悬吊结构,如悬索桥、斜拉索桥跨结构、塔墩以及具有分离式拱助的大跨度下承式或中承式拱桥,可利用结构由于外界各种因素所引起的微小而不规则的振动来确定结构的动力特性。这种微振动通常称为“脉动”,它是由附近的车辆、机器等振动或附近地壳的微小破裂和远处的地震传来的脉动所产生。

结构的脉动有一重要特性,就是它能明显地反映出结构的固有频率。因为结构的脉动是因外界不规则的干扰所引起的,因此它具有各种频率成分,而结构的固有频率的谱量是脉动的主要成分,在脉动图上可直接量出。如图 5-5-41 所示结构脉动记录曲线,振幅呈现有规律的增减现象,凡振幅大波形光滑之处的频率都相同,而且多次重复出现。

此频率即为结构的基频。如果在结构不同部位同时进行检测,记录在同一记录纸上,读出同一瞬时各测点的振幅值,并注意它们之间的相位关系,则可分析得到某一固有频率的振型。



图 5-5-41 结构脉动曲线

在桥梁结构的正常运营条件下,经常地作用于结构上的动力荷载是各类车辆荷载,在进行桥梁的动载试验中,首先应考虑采用车辆荷载作为试验荷载,以便确定桥梁在使用荷载作用下动力特性及响应。对需要考虑风动荷载或地震荷载的桥梁,应结合桥梁的结构型式作进一步的研究。

### (三) 桥梁动载试验数据分析

桥梁结构的动力特性(例如结构的固有频率、阻尼系数和振型等),它们只与结构本身的固有性质有关(如结构的组成形式、刚度、质量分布和材料的性质等),而与荷载等其它条件无关。结构的动力特性是结构振动系统的基本特性,是进行结构动力分析所必须的参数。

对于比较简单的结构,一般只需结构的一阶频率,对于较复杂的结构动力分析,还应考虑第二、第三甚至更高阶的固有频率及相应的振型。至于系统的阻尼特性只能通过实验的方法确定。

桥梁在实际的动荷载作用下,结构各控制部位的动力响应,如振幅、频率、速度和加速度以及反映结构整体动力作用的冲击系数等,除了可用来分析结构在动荷载作用下的受力状态外,还可验证或修改理论计算值,并作为结构设计的依据。

#### 1. 结构固有频率的测定

按照前面叙述的激振方法,使桥梁产生自由振动,通过测试系统实测记录结构的衰减振动波形,如图 5-5-42 所示。在记录的振动小组形曲线上,可根据时标符号直接计算出结构的固有频率  $f_0$  :

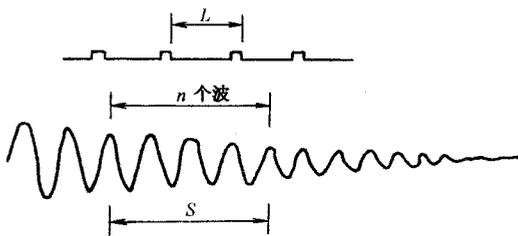


图 5-5-42 由衰减振动曲线求固有频率

$$f_0 = \frac{Ln}{t_1 S} \quad (5-5-43)$$

式中  $L$ ——两个时标符号间的距离, mm;

$n$ ——波数;

$S$ —— $n$  个波长的距离, mm;

$t_1$ ——时标的间隔(常用 1s、0.1s、0.01s 三种标定值)。

在计算频率时,为消除冲击荷载的影响,开始的一、二个波形应舍弃,从第三个波形开始计算分析。

当使用激振器时,结构产生连续的周期性强迫振动,在激振器振动频率与结构的固有频率一致时,结构出现共振现象,振幅达到最大值,共振波峰处的频率即为结构的固有频率,如图 5-5-43 所示。

采用偏心式激振器时,由于激振力的大小与激振器转速的平方成正比,激振器数不同,激振力大小不一样。为便于比较,应将振幅折算成单位激振力作用下的振幅,即振幅除以相应的激振力,或者将振幅换算为在相同激振力作用下的振幅,即  $A/\omega^2$ ,其中  $A$  为振幅, $\omega$  为激振器的频率。以  $A/\omega^2$  为纵坐标, $\omega$  为横坐标出共振曲线,如图 5-5-43,曲线之峰值所对率即为结构的固有频率。

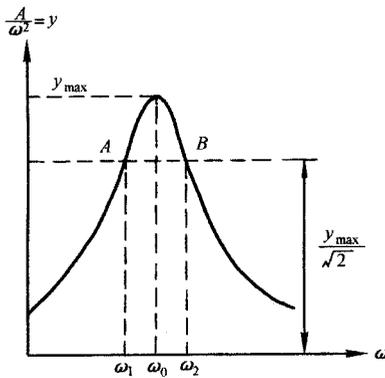


图 5-5-43 共振曲线

## 2. 结构阻尼的测定

桥梁结构的阻尼特性,一般用对数衰减率  $\delta$  或阻尼比  $D$  来表示。实测的由振动衰减曲线如图 5-5-44,由振动理论知,对数衰减率为

$$\delta = \ln \frac{A_i}{A_{i+1}} \quad (5-5-44)$$

式中  $A_i$ 、 $A_{i+1}$ ——相邻两个波的振幅值,可直接从衰减曲线上量取。

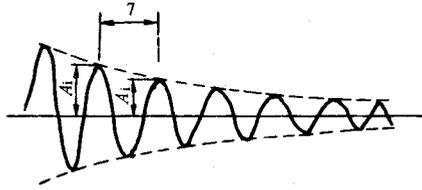


图 5-5-44 由衰减振动曲线求阻尼特性

实践中,常在衰减曲线上量取  $m$  个波形,求得平均的衰减率:

$$\delta_a = \frac{1}{m} \ln \frac{A_i}{A_{i+m}} \quad (5-5-45)$$

由振动理论知,对数衰减率  $\delta$  与阻尼比  $D$  的关系为

$$\delta = \frac{2\pi D}{\sqrt{1-D^2}} \quad (5-5-46)$$

对于一般材料的阻尼比都很小,因此

$$D \approx \frac{\delta}{2\pi} \quad (5-5-47)$$

图 5-5-45 为净跨 25m 预应力混凝土 T 型简支梁桥在动载试验时的自由振动和强迫振动波形曲线。

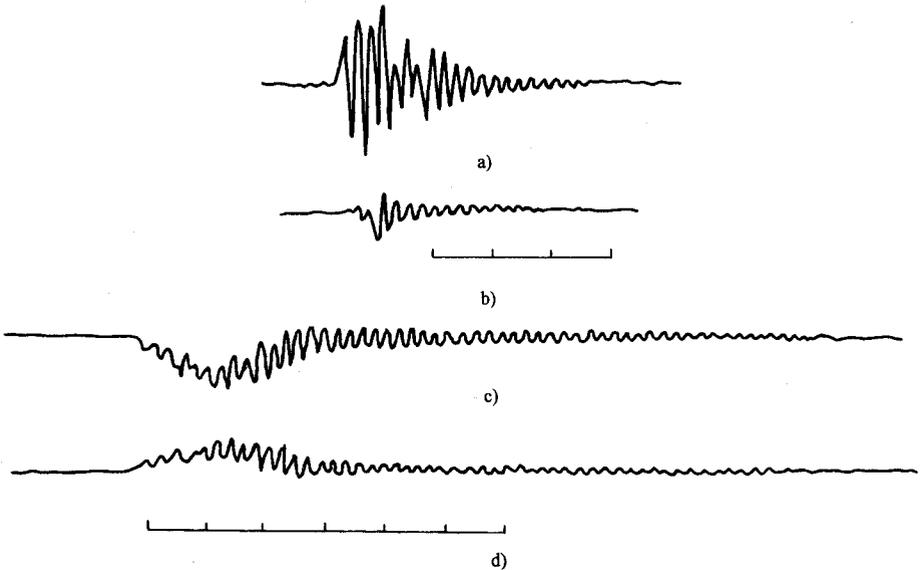


图 5-5-45 桥梁动载试验实测记录曲线

试验时,采用激振方法是用解放牌载重汽车驶越垫木后给桥梁一个冲击作用,使结

构产生自由振动。图 5-5-45a) b) 表示结构作自由衰减振动的波形记录。图 5-5-45a) 的波形是在跨中利用 WCD—5 型位移传感器,通过 Y6D—2 型动态电阻应变仪放大及 SC—16 型光线示波器记录的主梁挠度时历曲线。图 5-5-45b) 的波形是利用电阻应变片作为传感器测得的跨中断面预应力钢丝的应力时历曲线。由于挠度和钢丝应力的测点都位于同一控制断面,所以二者的波形相位是一致的。

按照前述的方法,可求出结构的动力特性:

$$\text{固有频率 } f_0 = 4.56 \text{ (次/秒)}$$

$$\text{对数衰减率 } b = 0.0876$$

$$\text{阻尼比 } D = 0.0139$$

应当指出,上述分析中,包含有载重汽车这一附加质量的影响。

图 5-5-45c) d) 为载重汽车以 28km/h 的速度通过桥梁时引起结构产生强迫振动的记录曲线如 5-5-45c) 挠度曲线,图 5-5-45d) 为钢丝应力曲线。由图可见,当汽车驶离桥跨后,桥跨结构恢复到静力平衡位置时仍在振动,只有在这个时候结构才作衰减自由振动。

在结构作自由衰减振动这一段记录上,仍可按上述方法求出结构的动力特性,但此时没有载重汽车的附加质量的影响。

仍用上述方法求出结构的动力特性:

$$\text{固有频率 } f_0 = 4.63 \text{ Hz}$$

$$\text{对数衰减率 } \delta = 0.062$$

$$\text{阻尼比 } D = 0.096$$

在实测的共振曲线上也可推算阻尼比,如图 5-5-43,具体作法是取  $Y_{\max}/\sqrt{2}$  值作一水平线,同曲线相交于 A、B 两点,其对应的横坐标为  $\omega_1$  和  $\omega_2$ ,即

$$\text{阻尼系数 } n = \frac{1}{2}(\omega_2 - \omega_1) \quad (5-5-48)$$

$$\text{阻尼比 } D = \frac{n}{\omega_0} = \frac{1}{2\omega_0(\omega_2 - \omega_1)} \quad (5-5-49)$$

式中  $\omega_0$ ——结构的固有频率。

### 3. 振型的测定

结构的振型是结构相应于各阶固有频率的振动形式,一个振动系统振型的数目与其自由度数目相等。桥梁结构是一个具有连续分布质量的体系。也就是说,桥梁是一无限多自由度体系,因此,其固有频率及相应的振型也有无限多个。但是,如前所述,对于一般的桥梁结构,第一固有频率即基频,对结构的动力分析才是重要的。对于较复杂的动力分析问题,也仅需前面几个固有频率。也就是说即在一般情况下,一些低阶振型才是

重要的。图 5-5-46 表示具有分布质量的各种梁的振型。

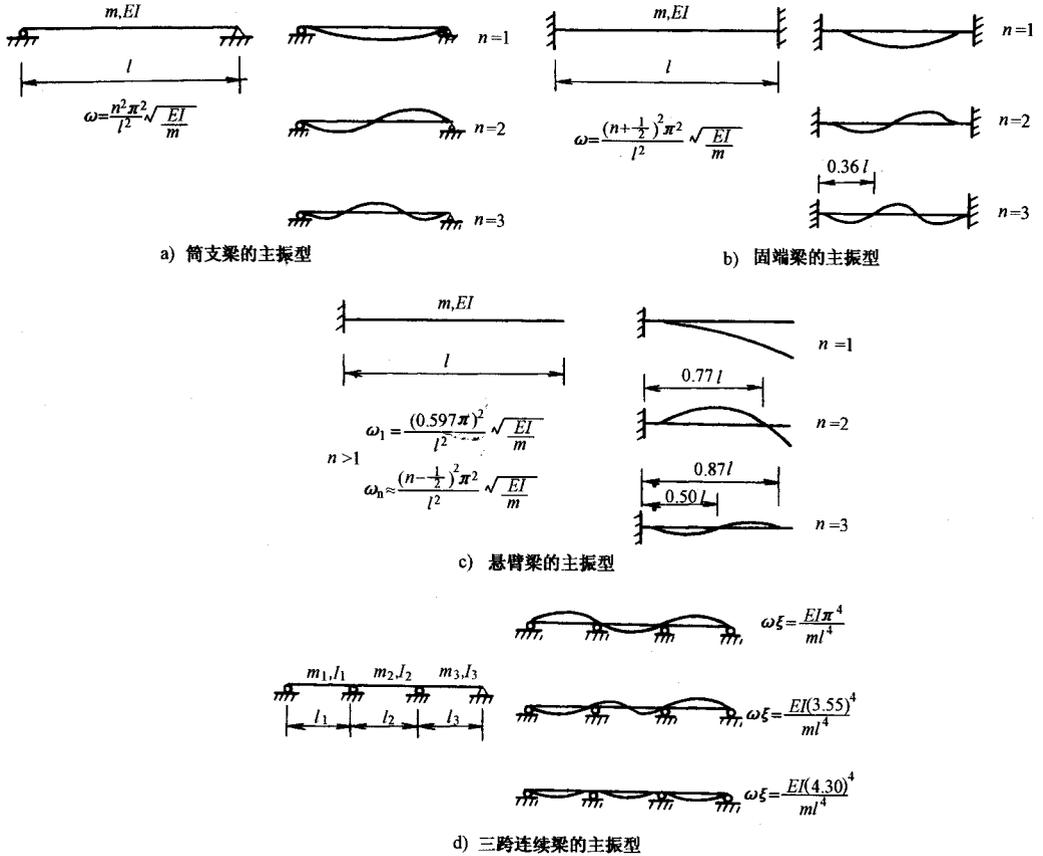


图 5-5-46 具有分布质量的各种梁的振型

采用共振法测定振型时，将若干传感器安装在结构各有关部位，当激励装置激发结构共振的同时记录结构各部位的振幅和相位，比较各测点的振幅及相位便可绘出振型曲线。

传感器的测点布置视结构形成而定，一般要根据理论分析，估计振型的大致形状，然后在变位较大的部位布点，以便能较好地连接出振型曲线。

振型的测定一般采用两种方法。一是在结构上同时安装许多传感器，这时必须保证预先要精确标定所有传感器的灵敏度，在用多路放大器时，还要求放大器的特性相同。另一种方法只用一个传感器，测试时要不断改变它的位置，以便测出各点的振幅。这种方法需要对传感器多次拆卸和安装，并且还需要有一个作用参考点不能移动的传感器，各次测定值均应同参考点对应比较。

#### 4. 结构动力响应的测定

在动力荷载作用下，桥梁结构某些部位的振动参数如振幅、频率、位移、应力等的测

定,可根据试验的具体要求和结构的型式布置测点,采用适当的仪表进行测试。动力荷载作用于结构上产生的动挠度,一般较同样的静荷载所产生的相应静挠度要大。动挠度与静挠度的比值称为活荷载的冲击系数。由于挠度反映了桥跨结构的整体变形,是衡量结构刚度的主要指标,因此活载冲击系数综合反映了荷载对桥梁的动力作用。它与结构的型式、车辆运行速度和桥面的平整度等有关。

为了测定冲击系数,应使车辆荷载以不同的速度驶过桥梁,并逐次记录跨中挠度的时历曲线,如图 5-5-47 所示。按冲击系数的定义有:

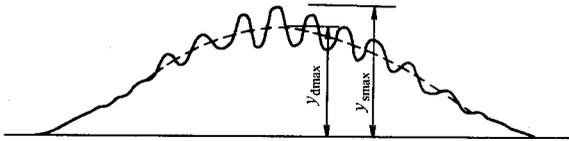


图 5-5-47 移动荷载作用下结构变形曲线

$$1 + \mu = \frac{Y_{dmax}}{Y_{smax}} \quad (5-5-50)$$

式中  $Y_{dmax}$  ——最大动挠度值;  
 $Y_{smax}$  ——最大静挠度值。

图 5-5-48 为 25m 预应力混凝土梁桥的强迫振动记录。图 5-5-48a)为跨中挠度的时间历程曲线,图 5-5-48b)为跨中断面预应力钢丝的应力时间历程曲线。试验采用的动荷载为解放牌载重汽车,速度为 22km/h,桥面为平整度很差的泥结碎石。

由图 5-5-48 可根据光线示波器记录图上直接量取  $Y_d$  值和  $Y_s$  值,则活荷载的冲击系数  $(1 + \mu)$  值为:

$$1 + \mu = \frac{Y_{dmax}}{Y_{smax}} = \frac{241.67}{166.64} = 1.45$$

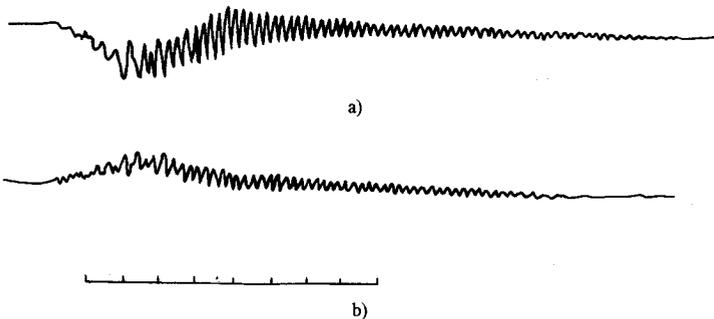


图 5-5-48 汽车过桥时结构振动图形

## 第六章 桥梁施工控制与监测

### 第一节 桥梁施工控制概述

#### 一、概述

施工是设计意图实现的关键,好的桥梁设计必须要有高水平的桥梁施工技术来支持;另一方面,桥梁施工技术的发展为桥梁设计意图的实现提供了灵活多样的手段,为新结构、新材料的推广应用提供了充分的技术保障。桥梁施工技术包含施工设计计算、施工方法、施工工艺、施工设备、施工控制等诸多内容。其中,施工控制是施工技术的重要组成部分,并始终贯穿于桥梁施工中。

桥梁施工,特别是大跨径桥梁的施工,是一个复杂的系统工程。在该系统中,设计图是目标,而从开工到竣工整个施工过程中,将受到许多确定和不确定因素的影响,包括设计计算假定、材料性能参数、施工精度、施工荷载、大气温度等诸多方面的因素,这些因素总会使实际状态与理想目标状态之间存在一定的差异。因此,在施工过程中如何从受各种因素影响而失真的参数中找出相对真实之值,对施工状态进行实时监测、预测、调整,对设计目标的实现是至关重要的。一般地,上述工作常以现代控制论为理论基础来进行,所以称之为施工控制。近年来,随着桥梁跨径不断增大,人们已普遍认识到施工控制在施工技术中的重要地位与作用,施工控制越来越成为施工技术的重要内容。实际上,桥梁施工控制早在以前的施工过程中就已被人们采用,如在施工中为了保证桥梁建成时的线型符合设计要求,在有支架施工时总是要在支架上设置预拱度;在悬臂施工中总是

要使施工节段的立模(或安装)标高高于设计标高一定数值,这实质上就是在对施工实施控制,这些方面处理的好坏常常被看作是施工技术水平高低的体现。

桥梁施工控制不仅是桥梁施工技术的重要组成部分,而且也是实施难度相对较大的部分。不同体系、不同施工方法、不同材料的桥梁,其施工控制技术要求也不一样。以钢桁梁的悬臂架设为例,为最终达到设计标高,通常采用预设拱度的方法来解决,即将先架设的节点预先抬高来考虑后架设节段的影响。由于钢材的匀质性和制造尺寸的相对准确性,预设拱度方法在钢桁梁悬臂拼装过程中是较为成功的方法。但是,对于同样采用悬臂浇筑法施工的混凝土桥梁就不那么容易,因为混凝土桥梁除了材料特性的离散性外,它还要受温度、湿度、时间等因素的影响,加上各节段混凝土的龄期、强度、持载历史等因素各不相同,这就会造成各节段的内力和变形随着混凝土浇筑过程变化而偏离设计值的现象,甚至出现超过设计允许的内力和变形。对这种情况,若不通过有效的施工控制实时跟踪、及时调整,就势必造成成桥状态的线型和内力不符合设计要求。

桥梁施工控制是确保桥梁施工宏观质量的关键。衡量一座桥梁的施工宏观质量标准就是其成桥状态的线型以及受力情况是否符合设计要求。对采用多工序、多阶段施工的桥梁上部结构,要求结构内力和标高的最终状态符合设计要求是很不容易的。例如混凝土斜拉桥,悬臂施工时主梁各节段要考虑预抬高以使其标高符合设计要求,同时还要求成桥状态下斜拉索的内力也达到设计要求,但由于斜拉桥是多次超静定结构,主梁标高的调整将影响到斜拉索的内力,某根斜拉索内力的调整又影响到主梁标高和邻近斜拉索的内力。因此,如不进行有效的监测控制,就可能導致内力或桥面线形难以达到设计目标值。例如我国某混凝土斜拉桥,由于种种原因,成桥后主梁外观呈波浪形,不但影响行车舒适,也留下外观缺陷。为此,应对施工过程的各阶段、各工序进行模拟,考虑混凝土徐变、收缩的影响,预先计算出各阶段内力和位移的预计值。将施工中的实测值与预计值进行比较,若相差超过允许的范围即进行调整,并通过对设计参数的识别和拉索索力的优化调整,实现施工作业与施工控制之间的良性循环,最后达到对主梁变形和拉索索力双重控制的目的,使各阶段内力和变形达到或接近预计值,确保桥梁的施工质量。

桥梁施工控制又是桥梁建设的安全保证,这一点对于大跨度桥梁更为突出。在施工过程中,由于每一阶段结构的内力和变形目标值是可以预计的,各施工阶段结构的实际内力和变形是可以监测得到的,这样就可以较全面地跟踪掌握施工进度和发展情况。当发现施工过程中监测的实际值与计算的预计值相差过大时,就要进行检查、分析原因,采取及时必要的措施,否则将可能出现事故。例如,跨径548.64m的加拿大魁北克桥曾在施工中两次发生事故,该桥采用悬臂拼装法施工,当南侧桁架快架架设完毕时,突然崩塌坠落,原因是桁架悬臂长度太长(悬臂长度176.8m),靠近中间墩处的下弦杆受力过大,致

使下弦杆腹板失去稳定而引起全桁架严重破坏。尽管造成事故的原因是设计问题,若当时采用了施工控制手段,在内力较大的杆件中布置监测测点,当发现异常现象时,及时停工检查,就不会发生突然崩塌坠落事故。由此可见,桥梁施工监测控制就是桥梁建设的安全系统,为确保桥梁施工安全,对施工过程进行监测控制是必不可少的。

## 二、桥梁施工控制与桥梁施工质量控制的关系

桥梁施工质量控制是对施工全过程的各工序进行检查、监督和管理,消除影响工程质量的各种不利因素,使所建造的工程符合设计图纸、技术规范和验收标准的要求。桥梁施工控制就是对桥梁施工过程中结构的受力、变形及稳定进行监控,使施工中的结构状态处于最优状态,保证施工过程安全和成桥状态(包括内力和线型状态)符合设计、规范要求。

从上述两者所做的工作和欲达到的目的来看,桥梁施工控制与桥梁施工质量控制目标是一致的,都是保证桥梁建设质量的手段。桥梁施工质量控制重在“微观控制”,而桥梁施工控制重在“宏观调控”,是桥梁施工质量控制的补充与前提。以悬臂浇筑施工的预应力混凝土梁桥为例,施工质量控制重在钢筋、钢绞线自身质量控制,波纹管安装精度控制,模板安装精度控制,混凝土原材料及混凝土拌制质量控制,混凝土浇筑、养护质量控制,混凝土强度检验、预应力张拉控制,管道灌浆质量控制等,而施工控制则是在施工过程中监测结构内力和变形情况,根据已施工完成节段内力和变形状态,在考虑各种影响因素后,确定下一节段的施工是否需要调整,或提供下一节段的立模标高。可见桥梁施工控制属于施工质量与安全控制范畴,虽不能完全替代质量控制,却为实现质量控制的总体目标提供保障。在小跨径桥梁施工中,往往不单独实施施工控制,而将施工控制的内容包含在施工质量控制中。

## 三、桥梁施工控制的发展

系统地实施桥梁施工控制的历史并不长。最早较系统地把工程控制论应用到桥梁施工管理中的是日本。20世纪80年代初,日本修建日夜野预应力混凝土连续梁桥时,就建立了施工控制所需的应力、挠度等参数的观测系统,并运用计算机对所测参数进行现场处理,然后将处理后的实测参数进行结构计算分析,最后将分析结果运用于现场进行施工控制。到80年代后期,日本在修建 Chichibu 斜拉桥和 Yokohama 海湾斜拉桥时,成功地利用计算机联网传输技术建立了一个用于拉索索力调整的自动监控系统,实现了施工过程中实测参数与设计值的快速验证比较,对保证施工安全和精度、加快工程进度起到了决定性的作用。该系统主要由自动测量数据采集、精度控制支持和结构计算机分析三

部分组成,但由于结构计算分析是借助控制室大型计算机进行的,因此,受通讯电缆架设费用等因素的影响,使其推广受到限制。此后,日本又研制一个以现场微机为主要计算分析手段的斜拉桥施工双控系统,这一系统除包含上述提及的三个部分外,还增加了两个数据库,即测量参数和计算参数数据库。此系统的最大特点是在现场完成自动测试、分析和控制全过程,并可进行设计值敏感性分析和实际结构行为预测。该系统在1989年建成的Nitchu桥和1991年建成的Tomei-Ashigara桥上应用效果良好。

在我国,在20世纪50年代就已注意到施工中结构内力和变形的调控,如1957年建成的武汉长江大桥在施工过程中就进行了应力、标高的调整,1982年,上海泖港大桥(主跨200m的斜拉桥)首次根据现代工程控制的基本思想,有效地进行了主梁挠度和索塔塔顶水平位移的施工控制。进入80年代后期,随着计算机辅助桥梁施工的发展,桥梁施工控制技术在工程实践中获得了广泛的应用,并取得了较好成果。

目前,桥梁施工控制技术已纳入常规施工管理工作中,控制方法已从人工测量、分析与预报,发展到监控、分析、预报、调整的自动化控制,并已形成了较完善的桥梁施工控制系统。即便如此,由于影响桥梁施工的因素非常复杂,同时,新结构、大跨度、超大跨度桥梁也对施工控制提出了更高的要求,因此,深入研究桥梁施工控制理论与方法,研制更加合理实用的软件,开发更加方便、精确的监测仪器设备,建立完善的桥梁施工控制系统仍是桥梁建设事业发展的迫切需要。

## 第二节 桥梁施工控制的工作内容

桥梁施工控制的任务就是要确保在施工过程中桥梁结构的内力和变形始终处于容许的安全范围内,确保成桥状态(包括成桥线型与成桥结构内力)符合设计要求。桥梁施工控制围绕上述控制任务而展开,不同类型的桥梁,其施工控制工作内容不全相同,但从总体上来看,包括以下几个方面。

### 一、几何(变形)控制

不论采用什么施工方法,桥梁结构在施工过程中总要产生变形。结构的变形受到诸多因素的影响,会使桥梁结构在施工过程中的实际位置(立面标高,平面位置)偏离预期状态,甚至导致桥梁难以顺利合拢,或造成成桥线形与设计目标不符。桥梁施工控制中的几何控制就是使桥梁结构在施工中的实际状态与预期状态之间的偏差控制在容许范

围内,成桥线形状态符合设计要求。

与桥梁工程质量的优劣需用其质量检验评定标准来检验一样,施工控制的结果也需要有一定的标准,即用偏差容许值来评判。偏差容许值与桥梁的规模、跨径大小、技术难度等有关,目前还没有统一规定,常根据具体桥梁的施工控制需要来确定。同时,为保证几何控制总目标的实现,每道工序的几何控制偏差的允许范围也需事先确定出来。下面根据一些桥梁施工控制的实例,列出目前几种主要桥型常见施工控制指标(表 5-6-1~表 5-6-3),供参考。

表 5-6-1 悬臂浇筑预应力混凝土连续梁桥、连续-刚构桥偏差限值(mm)

控制项目	成桥后线形	合拢相对高差	轴 线
控制偏差限值	$\pm 50$	$\pm 30$	按施工技术规范(JTJ 014-89)执行

表 5-6-2 混凝土斜拉桥偏差限值(mm)

索塔	控制项目	轴线偏位	倾斜度	塔顶高程
	控制偏差限值	$\pm 10$	$< H/2500$ 且 $< 30$	$\pm 10$
主梁(悬浇时)	控制项目	轴线偏位	合拢高差	线形
	控制偏差限值	$\pm 10$	$\pm 30$	$\pm 40$
主梁(悬拼时)	控制项目	轴线偏位	拼接高程	合拢高差
	控制偏差限值	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 30$

表 5-6-3 悬索桥施工控制偏差限值(mm)

索塔	控制项目	轴线偏位	倾斜度	塔顶高程	
	控制偏差限值	$\pm 10$	$< H/2500$ 且 $< 30$	$\pm 10$	
主缆线形	控制项目	基准索标高	基准索股高差	索股标高	主缆标高
	控制偏差限值	$\pm 20$	$\pm 10$	$\pm 10$	$\pm 50$
索夹安装	控制项目	纵横向偏位	纵向位置	横向扭转	
	控制偏差限值	$\pm 20$	$\pm 10$	$\pm 6$	
索鞍偏移、 高程	控制项目	纵横向位置	标高	中线偏差	高程偏差
	控制偏差限值	$\pm 10$	$\pm 20$	$\pm 2$	$\pm 20$

注:表 5-6-2、表 5-6-3 中  $H$  为索塔高度。

## 二、应力控制

桥梁结构在施工过程中以及在成桥状态的受力情况是否与设计相符合是施工控制要解决的重要问题。通常通过结构应力的监测来了解实际应力状态,若发现实际应力状态与理论计算应力状态的差别超限就要进行原因查找和调控,使之控制在允许范围之内。一旦结构应力超出允许范围,轻者会给结构造成危害,重者将会发生结构破坏。所

以,它比变形控制显得更加重要,因此必须对结构应力实施严格监控。应力控制的项目和限值目前尚无明确的规定,需根据实际情况确定,通常包括以下几个方面。

1. 结构在自重下的应力;
2. 结构在施工荷载下的应力;
3. 结构预加应力;
4. 斜拉桥拉索张力;
5. 悬索桥主缆、吊杆拉力,中下承式拱桥吊杆拉力;
6. 温度应力,特别是大体积基础、墩柱的温度应力;
7. 其他应力,如基础变位、风荷载、雪荷载等引起的结构应力。
8. 施工设备如支架、挂篮、缆索吊装系统等的应力。

### 三、稳定控制

桥梁结构的稳定性关系到桥梁结构的安全,它与桥梁的强度有着同等的甚至更重要的意义。桥梁施工过程中不仅要严格控制变形和应力,而且要严格地控制施工各阶段结构构件的局部和整体稳定。桥梁的稳定安全系数是衡量结构安全的重要指标,但现行规范中尚未详细列出各种结构在不同工况下的最小稳定系数,有待进一步完善。目前主要通过稳定分析计算,并结合结构应力、变形情况来综合评定、控制其稳定性。此外,除桥梁结构本身的稳定性必须得到控制外,施工过程中所用的支架、挂篮、缆索吊装系统等施工设备的稳定性也应满足要求。

### 四、安全控制

桥梁施工过程中安全控制是桥梁施工控制的重要内容,桥梁施工安全控制是上述变形控制、应力控制、稳定控制的综合体现。变形控制、应力控制、稳定控制取得了成效,安全控制也就得到了保障。结构型式不同,直接影响施工安全的因素也不一样,在施工控制中需根据实际情况,确定其安全控制重点。

## 第三节 桥梁施工控制的理论与方法

### 一、现代控制论简介

控制论作为一门技术科学,在过去的几十年中取得了长足的进展,其发展过程大体

上可分为三个阶段。第一代控制理论指经典控制理论,经典控制理论是指 20 世纪 60 年代前逐步发展起来的控制理论,其主要研究对象是具有单输入单输出的单变量的线性系统。系统的分析的主要工具是传递函数,系统的动态性能主要决定于传递函数所对应的零点与极点的分布情况,属于频域分析的范畴。第二代控制理论指现代控制理论。现代控制理论通常是指 20 世纪 60 年代以后迅速发展起来的控制理论,其研究的对象主要是多输入、多输出的多变量系统,这类系统可以是线性的,也可以是非线性的;可以是定常的,也可以是时变的。系统的数学模型描述主要采用状态方程,系统的动态性能主要决定于状态方程的解,系统的分析与综合主要采用状态空间分析法,属于时域分析的范畴。第三代控制理论指大系统理论和智能控制理论,大系统的主要特点是包含若干个子系统,如大型电力网、大型通信网、大型交通网、大型土建工程等,这些子系统通过控制中心协调工作,采用多级递阶控制以实现多指标综合最优化。所谓大系统就是规模十分庞大的系统。

现代控制理论是在经典控制理论的基础上发展起来的,并形成了很多独立的分支,如反馈控制、最优控制、自适应控制、模糊控制等,目前,应用最广泛的是最优控制理论。一般地,系统是线性的、定常的、随机的、具有多个输入输出变量,在进行控制时常常涉及到系统状态的最优估计与预报、最优控制向量的大小、系统辨识等问题,桥梁施工控制也具有这些特点。以较为常用的随机最优控制为例,其控制框图如图 5-6-1 所示,控制的基本理论可归纳如下。

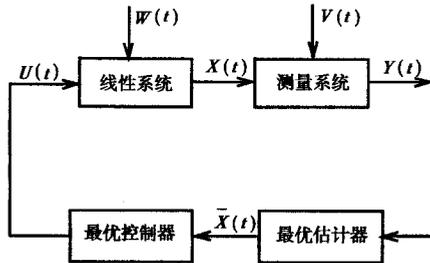


图 5-6-1 随机最优控制实施框图

最优控制问题是在已知系统的状态方程、初始条件以及某些约束条件下,寻求一个最优控制向量,使系统的状态或输出在控制向量作用下满足某种准则或使某一性能指标达到最优值。根据数学模型的不同,最优控制问题可分为确定性的最优控制问题和非确定性的最优控制问题。确定性的最优控制问题是指控制对象的运动规律可以用确定的数学模型来描述。这是现代控制理论中发展较为成熟的一部分,其核心内容是控制对象在性能指标最优的条件下,求解系统控制向量与状态变量之间的变化规律。找到了这个

规律,也就找到了实现最优控制的途径。非确定性的最优控制问题也称为随机控制问题。这类问题特点是控制对象的输入与输出量测中均存在的随机的噪声干扰,即数学模型中含有随机变量,解决这类问题,需要用概率论与随机过程理论等数学工具。对于随机最优控制,根据分离原理,控制可以分为确定性最优控制和状态向量的最优估计两部分串联而构成,最优控制器只与状态向量和目标函数有关,而与随机干扰、量测噪声和初始状态无关,最优估计只与随机干扰、量测噪声和初始状态有关,而与控制向量无关。

一般地,线性定常随机最优控制系统的数学描述如下。

$$\text{状态方程} \quad \dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) + W(t) \quad (5-6-1)$$

$$\text{量测方程} \quad Y(t) = C(t)X(t) + V(t) \quad (5-6-2)$$

式中  $X(t)$ ——状态向量;

$U(t)$ ——控制向量;

$W(t)$ ——随机干扰;

$Y(t)$ ——量测向量;

$V(t)$ ——量测噪声。

而  $A(t)$  为系统特性矩阵,  $B(t)$  为控制作用分布矩阵,  $C(t)$  为量测矩阵。

$$\text{控制向量的约束条件} \quad U(t) \in \bar{U} \quad (5-6-3)$$

式中  $\bar{U}$ ——一个封闭的点集合,称为控制域。

$$\text{初始条件为} \quad X(t_0) = X_0 \quad (5-6-4)$$

终值条件表示终止时刻  $t_f$  的状态,它可以是状态空间中的一个确定点,也可以是状态空间中的某一个目标集中的任一点,通常表示为

$$X(t_f) = X_f \quad (5-6-5)$$

指标函数也称性能指标。最优控制实际上是在某个性能指标下的最优控制,性能指标一般表示为

$$J = \phi[X(t_f), \dot{t}_f] + \int_{t_0}^{t_f} f(X(t), U(t), t) dt \quad (5-6-6)$$

式中第一项为终值性能指标,第二项为积分项性能指标。对于常见随机最优控制问题,性能指标可以进一步表示为

$$J = \frac{1}{2} E \left\{ \int_{t_0}^{t_f} [X^T(t) Q_1 X(t) + U^T(t) Q_2 U(t)] dt \right\} \quad (5-6-7)$$

式中  $Q_1$ 、 $Q_2$ ——加权矩阵,反映了控制过程各变量的相对重要性;

$E\{\}$ ——数学期望。

可见随机最优控制就是系统的状态方程在给定初始条件  $X(t_0) = X_0$  和随机干扰作用下,选择有约束或无约束的控制向量  $U(t)$ ,使  $X(t)$  从初始状态出发,在时间区域  $t_0, t_f$

$t_f$  中转移到目标集,并在沿着这条状态轨迹转移过程中,使性能指标取得极值,则称所选择的控制向量  $U$  为最优控制。一般地,最优控制问题的求解方法可采用庞特里亚金极大值原理和贝尔曼动态规划方法,所得到的最优控制向量为

$$U(t) = -L(t)\bar{X}(t) \quad (5-6-8)$$

式中  $L(t)$ ——控制增益矩阵;

$\bar{X}(t)$ ——状态向量的最优估计值。

即随机最优控制向量是状态向量最优估计值  $\bar{X}(t)$  的线性函数,可以用简单的线性反馈来实现。一般地,如式(5-6-2)所示,量测到的状态变量信号总由有用信号  $X(t)$  和量测噪声  $V(t)$  混合组成,为此要进行状态向量的最优估计。最优估计值就是要从量测信号中去伪存真,求得最接近真实情况的估计值,解决最优估计的最常用的方法是卡尔曼滤波法。

在控制过程中,系统辨识也是一个经常遇到的问题。所谓系统辨识就是通过观测一个系统或一个过程的输入、输出关系来确定其数学模型的方法。在许多实际系统中,由于根据物理、化学定律而推导建立起来的所谓机理模型一般都比较复杂,用它不便于寻求一个最优控制方案,或者由于没有足够的有关系统及其环境的先验知识,因而无法确定其内部结构或参数大小,因此,面临的首要问题就是通过试验,量测系统的输入、输出,从中找出一个既简单又能最恰当地描述该系统特征的数学模型,这样才便于实现最优控制。系统辨识由数据、模型和准则三个要素构成,按照准则在一组模型中选择一个与数据拟合得最好的模型。系统辨识框图如图 5-6-2 所示。系统辨识的内容和步骤包括辨识准备、试验设计、模型选择与结构参数辨识、模型参数估计与验证。系统辨识的基本方法包括最小二乘法、极大似然法等。

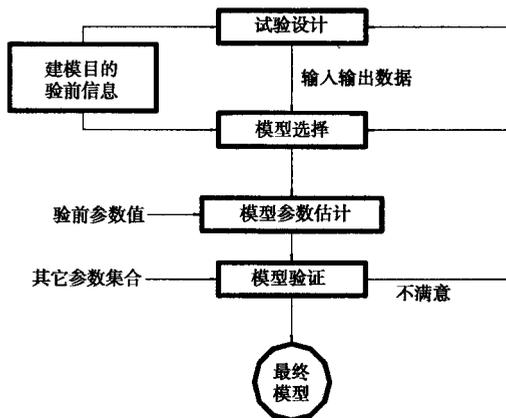


图 5-6-2 系统辨识基本原理图

除了上述提及的随机最优控制理论、系统辨识之外,现代控制论的其它一些分支如自适应控制、模糊控制、智能控制等理论也广泛地应用于工程实践,这部分的内容比较庞杂,可参见有关书目。

### 二、桥梁施工控制方法

桥梁施工是一个复杂的系统工程,桥梁施工的过程也就是该系统的运行过程,施工过程中结构的受力状态、安全性能和成桥状态是桥梁施工控制的目标,在整个施工过程中,受许多确定和不确定因素的影响,会使实际状态与理想目标状态之间存在一定的差异。因此,对施工状态进行实时监测、预测、调整,从而实现设计目标就成为桥梁施工控制的中心任务。一般地,桥梁施工控制是以上述现代控制论为理论基础,根据具体桥型特点,将结构内力、线形作为状态向量,将拉索或预应力钢筋张拉力等作为控制向量,控制流程大致可归纳如下。

1. 每一施工阶段(或节段)的结构内力、变形进行监控测量。测量的内容包括结构高程及线形的变化,结构主要截面的应力状态,主要材料试验结果如混凝土的弹性模量、容重等,主要施工设备的重量、位置等,对于斜拉桥、系杆拱还包括拉索索力。

2. 计算参数及结构状态的估计。需要估计的计算参数包括混凝土的弹性模量的变化规律、预应力损失、收缩徐变系数、构件日照温差的变化范围等,这些参数的估计可以采用基于结构静力分析的参数辨识方法。结构状态的估计是指从包含有量测误差的监控测量结果中进行状态向量的最优估计。

3. 结构模拟分析。通过结构倒退分析,基于计算参数的最优估计结果,计算出各施工阶段结构的理想目标状态,通过结构前进分析,计算出下一施工阶段(或节段)结构内力、标高的预测值。结构模拟分析一般采用专用的桥梁施工控制分析软件进行。

4. 比较各施工阶段(或节段)的目标状态与实际状态。如果二者的偏差超过事先确定的范围,根据前述控制论的基本理论和实际状态监控测量的结果,通过结构模拟分析计算,确定拉索或预应力钢筋张拉力、预抬高量等控制量调整方法和调整量值,以使实际状态与目标状态尽可能接近。

5. 对每一施工阶段(或节段),按照上述流程进行监控测量、状态估计、模拟分析、控制量调整,直至桥梁施工完成,使每一施工过程状态及成桥状态均接近目标状态。

随着桥梁结构形式、施工特点及具体控制内容的不同,其施工控制方法也不相同。总的来讲,桥梁施工控制可分为事后控制法、预测控制法、自适应控制法、最大宽容度法等,结合应用实例简述如下。

事后调整控制法是指在施工过程中,对已经施工完成的结构部分进行检查,当状态

与设计要求不符时,即可通过一定手段对其进行调整,使之达到要求。这种方法仅适用于那些结构内力与线形能够调整的情况,斜拉桥就是其中的一种。事后调整根据具体情况又分两种。一种方法是施工过程中每个施工阶段(或节段)完成后,当发现结构状态与设计不符时,即可通过调整斜拉索力来调整结构状态,然后继续施工,直到施工完成。这种方法工作量很大,并且索力调整本身也较麻烦,调整效果也不一定好。另一种方法是在桥梁结构形成后,检查结构状态,如果与设计不符,则可对斜拉索力进行一次性调整。这种方法从理论上讲也是可行的,但其实施较困难。因对施工过程中的结构内力状态不清楚,容易出现安全事故,且最终的线形往往难以达到理想状态。所以,事后调整不是一个好的控制方法,只能算是一个补救措施。

预测控制法是指在全面考虑影响桥梁结构状态的各种因素和施工所要达到的目标后,对结构的每一个施工阶段(节段)形成前后的状态进行预测,使施工沿着预定状态进行。由于预测状态与实际状态间免不了有偏差存在,某种偏差对施工目标的影响则在后续施工状态的预测时予以考虑,以此循环,直到施工完成和获得与设计相符合的结构状态。预测控制法是桥梁施工控制的主要方法。预测控制以现代控制论为理论基础,其预测方法常见的有卡尔曼滤波法、灰色理论法等,基本原理框图如图5-6-3所示。

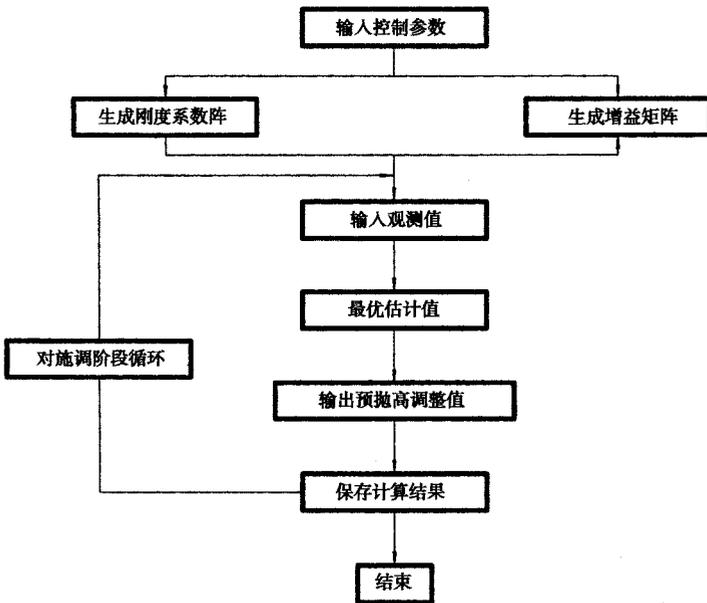


图 5-6-3 随机最优施工控制实施过程框图

自适应控制法也称为参数识别修正法。它是指在施工过程中,结构的某些设计参数如容重、弹性模量、混凝土的收缩徐变系数、摩擦系数等与实际情况不完全相符,系统不

能按设计要求得到符合目标的输出结果。因此,可以通过系统辨识或参数估计,根据桥梁结构变形、应力等方面的实测结果与按照参数的初步估计值的理论计算结果的反复比较,来逐步逼近结构设计计算参数的真实值,不断地修正参数,使实际输出与目标值逼近,从而实现控制意图。图 5-6-4 所示为自适应施工控制流程图。

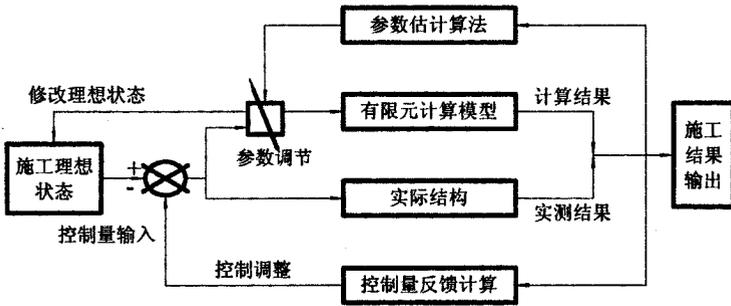


图 5-6-4 自适应施工控制实施框图

还有一种方法是在设计时给予主梁标高中和内力最大的宽容度,即偏差的容许值。如某斜拉桥悬臂长为 215m,主梁线形设计的宽容度达  $\pm 15\text{cm}$ ,同时对每一节段的偏差也规定了限值范围,这种做法减小了控制难度。此外,当采用支架法施工时,支架安全控制则主要通过对支架应力、变形进行跟踪监测,并将其监测值与相应计算值比较,判断是否在安全范围内,若有异常出现,则暂停施工,查找原因,确保施工安全。

### 三、影响桥梁施工控制的因素

大跨度桥梁施工控制的主要目的是使施工实际状态最大限度地与设计理想状态相吻合。要实现上述目标,就必须全面了解可能使施工状态偏离理想设计状态的所有因素,以便对施工实施有的放矢的有效控制。一般说来,影响桥梁施工控制的因素主要有以下几方面。

#### 1. 结构参数

不论何种桥梁的施工控制,结构参数都是必须考虑的重要因素。结构参数是施工控制中结构施工模拟分析的基本资料,其准确性直接影响分析结果的准确性。事实上,实际桥梁结构参数一般是很难与设计所采用的结构参数完全吻合的,总是存在一定的偏差。施工控制中如何恰当地计入这些偏差,使结构参数尽量接近桥梁的真实结构参数,是首先需要解决的问题。结构参数主要包括:

(1) 结构构件截面尺寸。任何施工都可能存在截面尺寸误差,验收规范中也允许出现不超过限值的误差,而这种误差将直接导致截面特性误差,从而直接影响结构内力、变形等的分析结果。所以,控制过程中要对结构尺寸进行动态取值和误差分析。

(2)材料弹性模量。结构材料弹性模量和结构变形有直接关系,对通常遇到的超静定结构来讲,弹性模量对结构分析结果影响更大。但混凝土结构的弹性模量总会与设计采用值产生偏差,所以,在施工过程中要根据施工进度经常性地进行现场抽样试验,特别是在混凝土强度波动较大的情况下,应随时对材料弹性模量的取值进行修正。

(3)材料容重。材料容重是引起结构内力与变形主要因素,施工控制中必须要计入实际容重与设计取值间可能存在的偏差,特别是混凝土材料,不同的集料与不同的钢筋含量都会对容重产生影响,施工控制中必须对其进行准确估计与识别。

(4)材料热膨胀系数。热膨胀系数的准确与否也将对施工控制产生影响,尤其是钢结构要特别注意。

(5)施工荷载。施工荷载对受力与变形的影响在控制分析中是不能忽略的,一定要根据实际取值。

(6)预加应力。预加应力是预应力混凝土结构内力与变形控制时要考虑的重要结构参数,但预加应力值的大小受很多因素的影响,包括张拉设备、管道摩阻、预应力钢筋断面尺寸、弹性模量等,施工控制中要对其取值偏差做出合理估计。斜拉桥索力直接影响结构变形与受力,了解各阶段真实索力是非常必要的。

## 2. 施工工艺

施工控制是为施工服务的,反过来,施工工艺的好坏又直接影响控制目标的实现,除要求施工工艺必须符合施工规范要求外,在施工控制中尚须计入构件制作、安装等方面的误差。

## 3. 施工监测

监测包括结构温度监测、应力监测、变形监测等,是桥梁施工控制最基本的手段之一。由于测量仪器仪表、测量方法、数据采集、环境条件等因素的影响,施工监控测量结果会存在误差。该误差一方面可能造成结构实际参数、状态与目标值吻合较好的假象,也可能造成将本来较好的状态调整得更差的情况,所以,保证测量的可靠性对施工控制极为重要。在控制过程中,除要从测量仪器设备、方法上尽量设法减小测量误差外,在进行控制分析时还应进行结构状态监控测量结果的最优估计。

## 4. 结构分析计算模型

无论采用什么分析方法和手段,总是要对实际桥梁结构进行简化,建立计算模型。这种简化使分析计算模型与实际结构受力情况之间存在误差,包括各种假定、边界条件处理、模型化的本身精度等。施工控制时需要在这方面做大量工作,必要时还要进行专门的试验研究,以使计算模型误差所产生的影响减到最低限度。

## 5. 温度变化

温度变化对桥梁结构的受力与变形影响很大。在不同时刻对结构状态(应力,变形状态)进行量测,其结果是不一样的。温度变化相当复杂,包括季节温差、日照温差、骤变

温差等方面,而在原定控制状态中又无法预先知道温度实际变化情况,通常在控制实施过程中是将控制理想状态定位在某一特定温度条件下进行模拟分析和结构状态监控测量,从而将温度变化不确知性剔除。

### 6. 混凝土的收缩徐变

对混凝土桥梁结构而言,材料收缩、徐变对结构内力、变形有较大的影响,当采用悬臂浇筑施工方法时,这一点比较突出,这主要是由于悬臂浇筑施工时各节段混凝土龄期、应力水准和加载持续时间相差较大,在施工控制时可采用参数辨识或模型试验方法来确定收缩徐变参数,以期采用较为合理的、符合实际的收缩、徐变计算模型。

### 7. 施工管理

施工管理好坏不仅直接影响桥梁施工质量、进度,也会影响施工控制的顺利进行。以悬臂浇筑施工的混凝土连续梁、连续刚构桥为例,如果两相对悬臂施工进度存在差别,就必然使两悬臂在合拢前等待不同的时间,从而产生不同的徐变变形,由于徐变变形较难准确估计,所以容易造成合拢困难。

## 四、桥梁施工控制系统

如前所述,影响桥梁施工控制的因素很多,牵涉到方方面面,要使桥梁施工安全、顺利地向前推进,达到预期的控制目标,就必须建立完善、有效的控制系统。

桥梁施工控制系统的功能要根据不同的工程施工实际情况来考虑,但不论是哪种类型的桥梁施工控制系统,都必须具备管理与控制的功能,即施工控制系统一般应由施工管理系统与现场控制系统两个分系统组成,而各分系统又由多个子系统组成。图 5-6-5 为桥梁施工控制系统框图。其中,施工现场控制分系统是整个施工管理、控制系统的核心,具有数据比较、结构当前状态估计、误差分析、参数识别、前进或倒退结构分析、未来状态预测等功能,施工现场控制分系统的流程框图如图 5-6-6 所示。

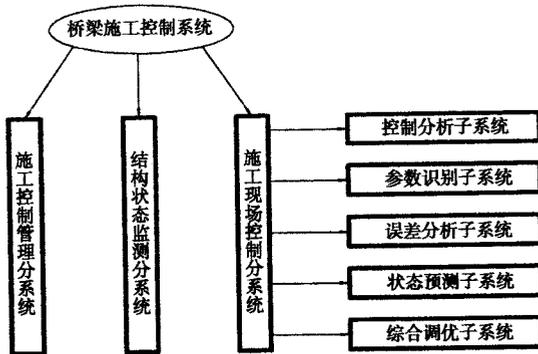


图 5-6-5 桥梁施工控制系统框图

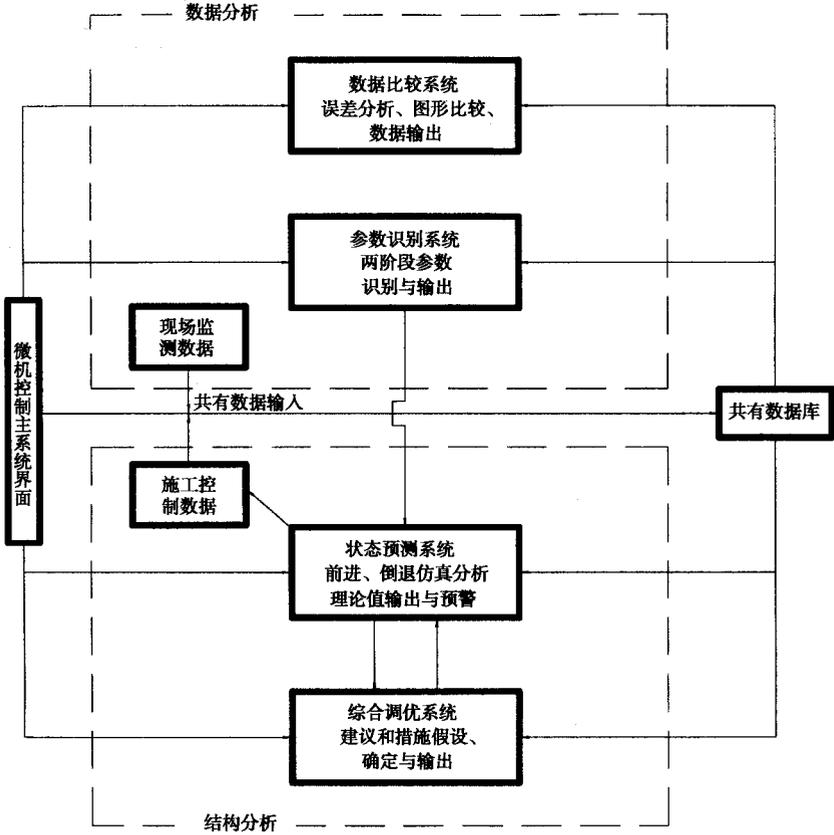


图 5-6-6 施工现场控制分系统的流程框图

在现场施工时,首先将由设计计算确定的各施工阶段的施工控制目标数据送入施工现场控制分系统,然后在当前施工阶段完成后的现场监测数据进行判别与滤波处理后,将其也送入施工现场控制分系统,该系统则对两方面的数据信息进行分析处理,最后输出有关信息数据供施工控制决策时参考。施工现场控制分系统通常由以下几个子系统组成。

### 1. 施工控制分析子系统

施工控制分析子系统必须具有很强的适应性、可操作性和可视性,以满足施工过程中结构逐步变化的要求,一般应能够快速、准确地完成结构施工过程的模拟分析,它是判别当前结构实际状态是否与目标状态相符合以及对未来状态进行预测的工具。用于施工控制分析的软件宜将计算结果数据转换成几何图形图像信息,以显示相应施工过程的结构内力与变形状态,形象地比较所控制项目的实测值、目标计算值以及参数的变化。

### 2. 参数识别子系统

参数识别子系统包括结构参数敏感性分析和结构参数识别计算分析两个子系统。结构参数敏感性分析是考察各参数对结构状态的影响程度,通过参数敏感性分析,将参数分类,确定出主要影响参数和次要影响参数,为参数识别打下基础。结构参数识别就是对结构参数进行分析、判定与确认,通过参数识别确定出结构参数的真实值,为准确地进行结构分析提供可靠数据。

### 3. 误差分析子系统

施工过程中总是存在误差,这些误差会使实际施工状态偏离理想状态和控制目标。该系统主要功能是对结构理想状态、实测状态和误差信息进行分析,选择最佳调整方案,使结构施工实际状态、设计理想状态的差值控制在允许范围内。

### 4. 状态预测调整子系统

该子系统的功能是在计入结构参数调整修改值、结构前一阶段状态最优估计值、结构施工误差、量测误差等信息后,通过控制模拟分析系统对结构施工状态确定出下一阶段的校正控制值,并通过修改施工方案予以实现。

### 5. 桥梁结构施工状态监测子系统

该系统包括对结构设计参数进行监测以及对结构状态(包括应力、变形或标高)参数进行量测两个子系统。前者主要是为控制模拟分析提供合理的基本参数,后者提供了结构实际状态参数,并由此判断当前施工状态是否与设计目标值相符合。

总之,桥梁施工控制是一个系统工程,牵涉的面很广,要有效地实施施工控制,就必须注重施工管理,注重控制实现的准确性与及时性,建立完善的控制系统和制订实施细则,并在实施中根据实际情况进行调整,否则施工控制很难取得预期的成效。

## 第四节 桥梁结构长期监测与诊断技术

自从 20 世纪 50 年代以来,人们就意识到桥梁安全监测的重要性。早期的监测主要针对桥梁结构的长期内力变形、基础的沉降等问题,涉及的内容比较单一,技术手段也以测量学方法为主,所以应用范围受到了一定的限制。近年来随着大跨桥梁的建设,桥梁结构性能的长期监测与健康诊断技术受到了国内外学术界、工程界的广泛重视,也在一些大跨度桥梁建设和运营过程中进行了有益的尝试,如丹麦对 Faroe 斜拉桥、Great Belt East 悬索桥进行了施工阶段及通车后的监测;挪威在主跨 530m 的 Skarnsundet 斜拉桥所安装的全自动数据采集系统已能对加速度、倾斜度、应变、温度、位移进行自动监测;我国

的青马大桥、虎门大桥、徐浦大桥、江阴长江大桥等在施工阶段已安装设置了传感设备,以备运营期间的实时监测。桥梁结构性能的长期监测与健康诊断技术的应用将起到确保桥梁运营安全、延长桥梁使用寿命的作用,同时能够较早地发现桥梁病害以利及时维修保养,降低桥梁的维修费用,并避免桥梁大修时关闭交通所引起的重大损失。以下就对桥梁结构内力变位的长期监测与健康诊断系统做一简要介绍。

## 一、桥梁内力(应力)变位的长期监测

在桥梁结构的使用过程中,由于受地质情况复杂、地下水位变化、混凝土收缩、徐变、温度变化、桥梁周边施工、使用荷载增大等种种因素的影响,桥梁结构的内力(应力)会发生变化,基础会产生沉降或变位,桥梁结构的线形或平面位置会产生变化,对于静定结构,这些变化往往引起桥面线形不顺畅,影响行车的舒适性;对于超静定结构,这些变化不仅会引起桥面线形不顺畅,而且会导致桥梁结构实际受力状况恶化,导致附属设施的破坏。就长期监测内容而言,其范围比较广,如超静定结构由于徐变而产生的内力、变形的变化,混凝土结构的裂缝开展情况、桥梁基础的沉降变位等;就重要性而言,上述因素对桥梁结构的影响是长期的、严重的,甚至会危及桥梁结构的安全使用,因此必须通过相应的监测方法、监测手段,掌握上述因素的变化规律、发展趋势以及其对桥梁结构受力状态、使用性能的影响程度。以较为常见的桥梁基础沉降或桥梁变位为例,以下对桥梁内力(应力)变位的长期监测的方法作一简要介绍。

所谓桥梁基础沉降或桥梁变位的长期监测,是指针对桥梁的某些几何变量、在一个较长的时间段内按照预定计划进行若干次测量、比较、分析的过程。目前,对于基础沉降和桥面线形的监测,一般常采用测量学方法,根据实际情况,按照测量学变形观测的基本理论,建立相应的观测网点和测量路线,利用全站仪、精密水准仪、测距仪、GPS全球定位系统等测量仪器设备,在独立假定的坐标系中,测量桥梁变位控制点的坐标。然后,通过对各次测量所得出的桥梁变位控制点坐标比较,分析判断桥梁结构长期变位的发展趋势,通过结构计算分析,得出由长期变位所产生的结构内力、应力增量。综合上述两个方面及设计内力、配筋等结构基本情况,就可以宏观判断桥梁结构的安全性能,提出相应的处理措施或荷载限制建议。在进行基础沉降和桥梁变位的长期监测时,除遵循测量学变形观测的基本原则之外,尚应注意以下几个问题。

### 1. 控制基准网与桥梁变形控制点布设

控制基准网应由4~6个以上的基准点组成,以构成若干个大地三角形。基准点应布置在桥梁以外的适当范围内,并与桥梁变形控制点具有良好的通视条件。在整个监测过程中,应定期对基准网进行检查,确保各基准点固定不变。

桥梁变形控制点的设置应根据桥梁结构的实际情况和观测目的来确定。变形控制点可以是相对高程观测点,可以是平面相对位置观测点,也可以是二者的结合,视桥梁结构具体情况和观测目的而定。一般说来,变形控制点应设在桥梁墩台基础等引起桥梁其它部位变位的部位,或设置在桥跨跨中、 $L/4$ 、 $3L/4$ 等变形较大的部位;对于斜拉桥、悬索桥,还应在索塔塔顶设置变形观测点。此外,为保证观测精度,尚应设置一些校核测点。变形测点宜采用强制归心标志,固定在易于保存的部位,必要时还要采取一些保护措施,以确保其在整个观测过程中相对于桥梁稳定不变。

### 2. 监测期限与监测安排

桥梁基础沉降和桥面变位长期监测的时间长度、观测时间间隔、观测安排等方面应根据所监测对象的特点及外部条件来确定。一般说来,监测由地质情况、地下水位变化、混凝土收缩徐变、温度变化等因素引起的桥梁变位时,监测的时间长度应在1年以上,以便能够较为准确地分析各影响因素的影响程度,排除一些次要因素,采取相应的对策。同时,只有确认由上述因素引起的变位已经基本稳定不变时,监测工作方可终止。监测由桥梁周边施工、使用荷载增大等因素引起的桥梁变位时,检测的时间长度可根据具体情况来确定。对于一些危桥、病桥的长期监测,监测的时间长度宜适当延长。至于观测时间间隔、观测安排,应根据桥梁结构的实际情况、外部条件和监测费用等方面来统筹考虑,一般地,由变化时限长的影响因素如年温差所引起的变位观测宜安排得稀疏一些,观测时间间隔宜长一些,而那些变化时限较短的影响因素所引起的变位观测宜安排得密集一些,观测时间间隔宜短一些。

### 3. 量测制度

(1)在整个观测过程中,所采用的仪器设备均应定时进行检查校验。

(2)在整个观测过程中,每次观测均采用相同观测线路,采用同一仪器设备,测量人员应固定不变。

(3)对于监测期限在1年以上的情况,量测时间安排应涵盖季节温湿变化、水文变化的各种极端情况。

(4)对于监测期限在2年以上的情况,每年相同季度、月份的观测条件应基本相同,以便观测结果的比较分析。

(5)每次测量应在夜间进行,以消除温度的影响。

(6)在整个观测过程中,如通过前一阶段的观测,发现监测桥梁的变位有突然变化时,应加密测量次数、增加测点布置。

总的说来,桥梁基础沉降和结构变位的长期监测要根据实际情况灵活地确定监测计划,以便有的放矢,以下简要介绍一个监测实例。某三跨桁架拱桥拓宽时在旧桥两侧各

修建一座新桥,新桥选用了与旧桥相同的跨径布置,旧桥为扩大基础,埋深较浅,新桥为桩基础,新桥基础距旧桥基础最小距离为 2.0m。同时,受交通状况及施工场地的制约,在新桥施工全过程中,旧桥要继续通行车辆;在新桥上部结构施工期间,旧桥上堆放了大量的施工机械和施工材料。为确保旧桥的安全,在新桥施工期间对旧桥进行了变位的中长期监测。在 140d 监测期限内,共进行了 29 期平面变位测量、78 期沉降测量工作。变形观测基准网设置在旧桥的四周,8 个变形测点设置在旧桥的桥墩、桥台上,如图 5-6-7 所示。为了提高观测精度,基准点与变形测点之间的距离均在 100m 以内,所有平面基准点均采用带有强制归心装置的混凝土观测墩,所有变形测点均安置强制归心装置,并采用铜质标心。

在监测实施时,按照二等变形测量要求,高程基准网布设成闭合水准路线,每段水准路线均进行往返观测。水平变位测量采用电子全站仪进行观测,各测站的水平方向、边长均观测 6 测回,确保每期观测的各项技术指标均符合规范要求。此外,为了检核基准网的稳定性,在监测过程中,对基准网进行了 6 次观测,确保基准网稳定不变。

考虑到施工荷载对旧桥各变形观测点影响较大,监测时根据旧桥内力分析计算结果,得出了不均匀沉降、变位的最大限值,提出了新桥上部结构施工期间旧桥的通行荷载和施工荷载限制建议。监测结果表明:荷载限制措施是有效的,新桥施工期间旧桥未发现异常情况,各变形观测点的累积最大沉降、最大水平位移量分别为 4.1mm、12.2mm,两墩台之间的累积最大不均匀沉降量为 1.7mm,最大不均匀水平位移为 4.3mm,新桥施工期间旧桥是安全的。

## 二、桥梁结构健康诊断技术

随着大跨桥梁的建设,桥梁结构性能的健康诊断技术得到了迅速地发展。所谓健康诊断系统,是指利用一些设置在桥梁关键部位的传感器、测试元件、测试仪器,实时在线地量测桥梁结构在运营过程中的各种反应,并将这些数据传输给中心控制系统,按照事先确定的评价方法与反应限值,实时地评价诊断桥梁结构的健康状况,必要时提出相应的处理措施,并在极端情况下(如台风、地震)给出警示信号或关闭交通。目前,桥梁结构健康诊断技术主要用于大跨度重要桥梁,是传统长期监测技术的发展和延伸,它的特点表现在:监测内容广泛全面,测试、诊断、评估实现了自动化,能够实时发现桥梁病害或不良反应并及时进行处理。桥梁结构性能的健康诊断技术不仅是保证大跨度桥梁的安全运营的重要手段,而且可以修改、完善大跨度桥梁的设计理论与设计规范,降低大跨度桥梁的维修费用,因此具有重大理论意义。

一般说来,桥梁健康诊断技术的内容包括以下几个方面。

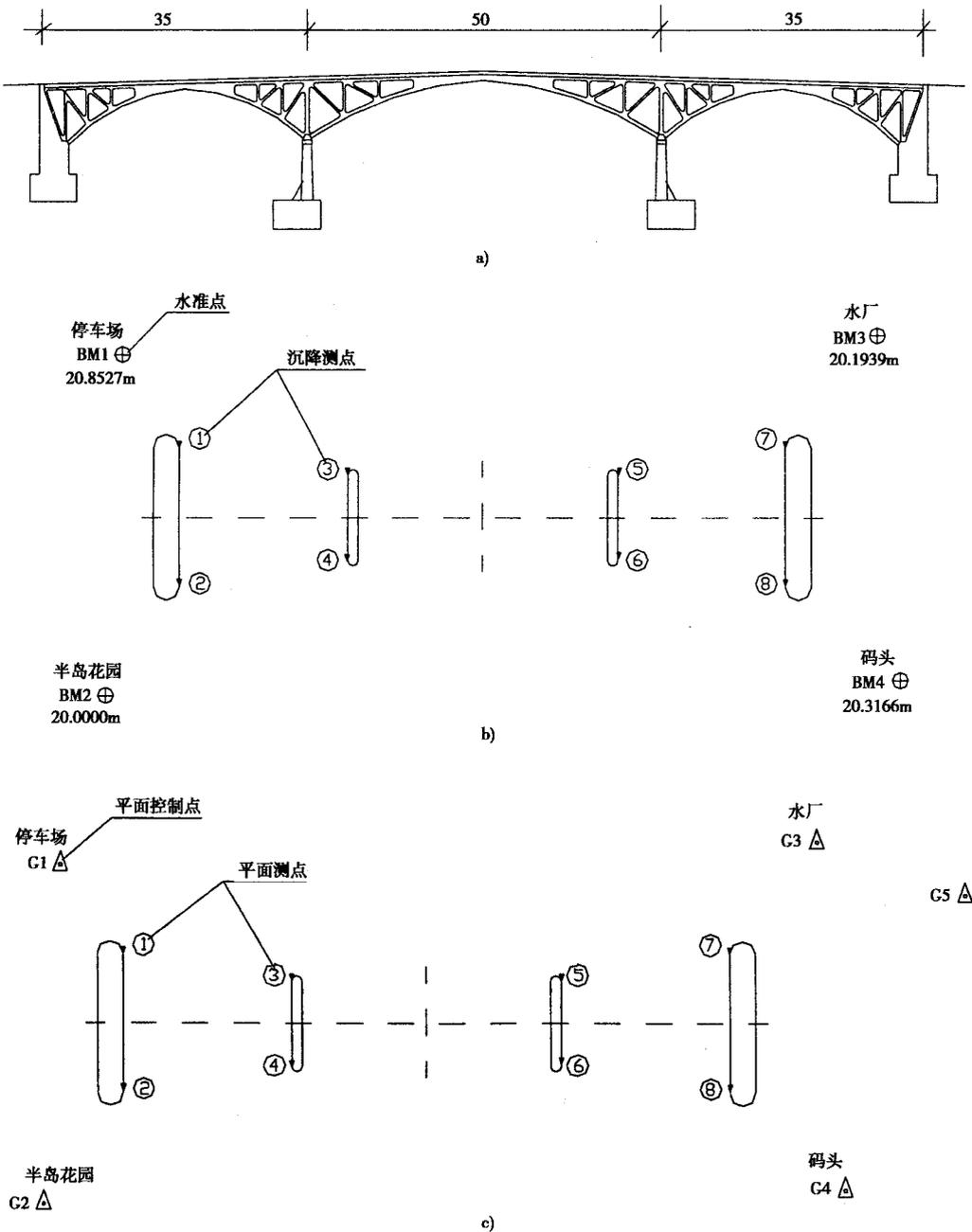


图 5-6-7 某桥长期监测基准网及变形控制点的布置

a) 监测桥梁立面布置(单位:m) b) 沉降测点与高程控制网 c) 水平变位测点与平面控制网

1. 桥梁荷载实时在线监控。监控内容包括风荷载、地震、温度和交通荷载。所使用的传感器大致有:风速仪,记录风向、风速,连接数据处理系统后可得风功率谱;温度计,

记录温度、温度差时程历史,动态地秤,记录交通荷载流时程历史,连接数据处理系统后可得交通荷载谱;强震仪,记录地震作用;摄像机,记录车流情况和交通事故。

2. 几何变位监测。采用位移计、倾角仪、GPS、电子测距器、数字像机等工具,监测桥梁各部位的静态位置和静位移,如索塔的水平变位和倾斜度、主缆和加劲梁的线形变化、支座和伸缩缝的相对位移等。

3. 结构反应监测。如采用应变仪记录桥梁主要受力构件的应变历程,以得到构件疲劳应力循环谱;采用测力计记录拉索、吊杆的张力历史;用拾振仪记录桥梁结构各部位的动态反应如加速度、振幅,分析监测结构的动力特性。

4. 建立桥梁结构状态的数据库。根据大量的、全面的监测数据结果,建立、更新桥梁结构性能、结构状态的数据库,利用模态分析技术,实时评估结构的损伤位置、程度、性质。

桥梁健康监测系统在采集到上述数据后,进行数据的分析处理,根据具体桥梁的特点,按照给定的评价方法与反应限值,实时地、合理地评估桥梁目前状态,评价诊断桥梁结构的健康状况。在突发性极端事件(如地震、台风)发生后,能够全面、快速的识别出结构损伤损坏程度,进行结构性能的全面评估,必要时提出相应的处理措施,以便采取交通管制措施或确定维修加固对策。

目前,桥梁健康诊断系统尚在进一步发展中,也仅用于大跨度重要桥梁。可以相信,随着技术的进步和人们对桥梁使用状况的重视,桥梁健康诊断监测技术必将会得到快速发展和广泛应用。

## 第七章 桥梁工程质量通病及防治

### 第一节 沉桩工程质量通病及防治

#### 一、锤击沉桩质量通病及防治

##### 1. 常见问题和解决方法

沉桩施工中常见问题、原因和一般处理方法,参见表 5-7-1。

表 5-7-1 沉桩施工常见问题和解决方法

序	问 题	原 因	处理方法
1	桩贯入度突然减小	桩由软土进入硬土,桩遇石块	不要硬打,应查明原因,对症处理
2	桩贯入度突然加大,随着发生倾斜	桩身破断,接头断裂,桩尖劈裂	管桩用灌水法,铁钩、电钳、照明等方法探明,如探不明则应拔桩后处理
3	桩发生倾斜和位移	桩尖不对称,遇到障碍物,桩顶不平,桩接头错动	如为桩尖、接头,则拔出处理,如桩顶不平,则削平加固
4	桩不下沉,桩身颤动,锤回跳	桩尖遇障碍物,桩身弯曲	偏移桩位,加装铁靴,射水配合。桩身过长可加夹杠,桩身弯曲过大,需换桩
5	桩身涌起	较粘层中,先打入的桩随土的涌起而涌起	对涌起量过大的,作冲击试验,不合格的桩要求复打
6	桩顶破裂或桩身开裂	桩顶混凝土质量太差,桩顶面与桩轴线不垂直,未安桩顶帽或没有缓冲垫等	木桩可截桩顶重做。混凝土桩在法兰接触面处不牢,主筋与法兰,桩尖焊接不牢,吊点位置和码放支点不正确等造成,则须分别预防和纠正。特别是在施工前应预先采取有效措施,以防管桩的断裂

## 2. 断裂破损桩的加固处理

对于沉入后已经断裂破损的桩,较为严重的应拔出重打或另补新桩外,其他可根据具体情况,作如下修补加固处理:

(1)河床以上部分 桩身露筋、混凝土脱落及裂纹较多的,可用薄钢板制成拼装式套筒,由潜水员安装于破损处桩的外围,套筒的长度应使套筒下端能放在河床上和视桩身破损部分的高度而定。将套筒内水抽干后灌筑混凝土或水抽不干时则可灌满水下混凝土。混凝土凝固后再拆除套筒。

(2)在河床以下桩已断裂时,如仅管壁混凝土破损,而钢筋未变形时,可净混凝土灌筑至顶部。如钢筋已变形弯曲时,可用通桩器等工具,参见图 5-7-1,将弯曲钢筋冲开,加置钢筋骨架后填充混凝土。通桩器应用直径大小不同的,由小至大逐步替换冲击,以扩大桩心通路。如钢筋弯曲均在上部,而桩的下端有足够锚固力时,可考虑用拔桩设备适当地将钢筋拉直,但应避免将桩的下段拨动,再进行填充加固处理。

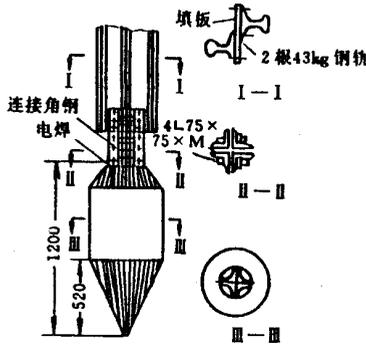


图 5-7-1 通桩器

注:单位:mm

(3)加固处理后的基桩,应进行静载试验。经试验合格,方可使用,如不合格,则加打新桩。

## 二、射水沉桩质量通病及防治

射水沉桩常见问题、原因及预防与处理方法见表 5-7-2。

表 5-7-2 射水沉桩常见问题、原因及防治方法

序号	问题	现象	原因	防治方法	备注
1	桩下沉发生困难	(1)由正常下沉突然变为不易下沉,锤击时桩身颤动,桩锤有回弹现象	桩尖遇到障碍物或坚硬土层	可适当延续锤击后会穿过障碍物继续下沉,但切忌硬打,如仍无效,可将桩拔出,检查桩尖有无碰撞障碍物的痕迹,必须时改移桩位	
		(2)桩下沉逐渐缓慢,最后除桩身颤动,桩锤回弹外无其他现象	一般是桩周土层摩阻力过大	此时不宜硬打,应增大射水量及水压,并可增加外射水,或改用锤击动能较大的桩锤	
2	桩突然急剧下沉	(1)当桩位正直无变化,在开始急剧下沉前,亦无锤击过猛射水过多,或无桩身颤动等情况时	桩穿过密实土层后进入软弱土层,亦可能因射水时间过长,桩尖下已冲空较大	一般可继续下沉,加强观察,但若当桩已接近设计入土深度时,则应考虑改变设计将桩加深,或增加桩数	
		(2)桩经过大量猛烈锤击以后突然下沉,或桩有偏斜现象	可能桩已断裂弯折	应立即停止下沉,分析情况,采取措施,或拔出换桩重打,或另加桩	
3	桩周停止翻水	水从桩顶空心内翻出或从邻桩处涌出	(1)桩身周围已被土挤塞密实现象,桩下沉缓慢或难于下沉 (2)射水水压、水量不足,或是曾用锤击使桩尖强行穿过密实土层	可加大射水压力、水量和延续射水时间并配合轻慢锤击或震动,或另加外射水,引水沿桩射周围上翻如对桩下沉无大阻碍时,可不作处理	
4	内射水管被顶起,且桩顶大量向外涌水	同右	射水嘴已被顶起缩入桩内	应立即停锤,继续射水,并摇动射水管,使劲下插,如桩入土不深时可将桩上拔少许,使射水管落出桩尖如仍不能解决,可将射水管拔起改作外射水或单用锤击或震动	
5	桩不下沉,桩内涌出大量清水		射水管在桩内断裂或漏水	可吊出射水管检修	
6	涌水由浑变清		射水时间过长,或桩已沉入卵石或砾石层	应适当地加强配合锤击	
7	停止涌水	(1)这时射水管无流水声音和感觉	(1)桩突然下沉,使桩尖撞击在硬层或孤石上,将射水嘴堵塞或砸扁,胶管胀紧并发生颤动,水压表指针上升、摆动	(1)将射水管提起少许,仍不通则拔出检修	
		(2)水流不能	(2)桩管弯折,使水管亦弯折压扁,水流不通	(2)应吊出射水管检修	
		(3)停水后,射水嘴涌入泥沙堵塞	(3)停水过急或接桩时停水时间过长所致	(3)缓停水或缩短接桩时间	
		(4)射水管内流水正常,压力表指针正常,压力表指针正常稳定,但不向上涌水	(4)水由渗水层流失	(4)如下沉困难,可加外射水管辅助或增大射水水量	

序号	问题	现象	原因	防治方法	备注
8	射水管 拨不出		停水后桩内下端被淤塞,挤住射水管	可在桩内另插入射水管射水冲击淤积后,射水管即可拔出	
9	水量与 水压不足	常出现涌水量小、涌出泥沙量少、桩周围不涌水、桩下沉极慢或下沉停止等现象	水泵设备能力不足,或管路有渗漏,管路内有障碍使水不畅通,或吸入空气进入水管或泵壳内等	查明情况后,可采取下列措施 (1)随时检查维修管路和机械设备 (2)保持水源清洁和适当水位 (3)开放水泵的放气阀,放出空气 (4)使用的管路不适合土质情况,如在砂土或砂夹砾石土层内,需较大水量时,应用稍大的水管,反之在坚硬粘土层内,需较大水压时,则应用稍小的水管或射水嘴	
10	涌水后 地面下沉	影响安放在地面的沉桩设备下沉,	由于砂土大量随水流失所致	应事先估计到土层下沉影响范围来布置脚手平台,施工中应随时检查、加固和修理。桩架下的垫木应采用长木料,或加设钢轨加固	
11	射水不 均衡造 成沉桩 的倾斜 或移位		使用外射水时,两边对称的射水管中的水量、水压不均衡,或两侧土质软硬不均,均可能使基桩走向软弱的一侧,先下沉的基桩一侧土受破坏较大破坏,虽经恢复,仍有差别,也可导致后下沉桩的偏斜或在下沉斜桩时土被冲松,由于桩身自重亦将使其斜度变大	(1)对称地安设外射水管,并注意掌握水量、水压的均衡 (2)插桩时预先偏向较坚实的一侧,具体偏移尺寸应视土质和实际经验确定,并在施工过程中不断验证修正 (3)在已偏斜的反方向增加射水的水量、水压,进行校正	

### 三、振动沉桩质量通病及防治

#### 1. 桩身产生横向裂纹

振动沉桩由于振动时有上拔力,易使混凝土产生横向裂纹,桩的接头螺栓也容易震松。因此,施工中应合理选锤和控制振动时间,不可过长、过猛。

#### 2. 桩机电机损坏

振动沉桩机上的电动机容易损坏,因此,施工中应注意合理使用,并且需有较熟练的电机修理技工,经常进行检修。

#### 3. 桩下沉困难

当桩基土层含有大量卵石或碎石或破裂岩层时,如采用高压射水振动桩仍难下沉时,可将管桩锥形桩尖改为开口桩靴,并用振动吸泥下沉(桩内设吸泥机配合吸泥),注意

要有足够的水压强度以破坏岩层(曾有例:水压达 4.5MPa,采用三部 1.5MPa 高压水泵串联使用)。

### 四、静力压桩质量通病及防治

#### 1. 桩尖走位和倾斜

插桩初压即遇有较大幅度的桩尖走位和倾斜,虽然采取强制固定措施,仍不见效时,说明桩尖下遇有障碍。须将桩拔出,清除障碍物后,回填土重新插桩。

#### 2. 桩身倾斜或下沉突然加快

沉桩过程中,桩身倾斜或下沉速度突然加快时,多为接头失效或桩身破裂。处理方法同锤击沉桩,在原柱位附近补压新桩。如在压桩过程中因卷扬机不同步而引起的临时倾斜,可随时调整卷扬机速度予以纠正。

#### 3. 压桩阻力突然增大

压桩过程中,当桩尖碰到夹砂层时,压桩阻力可能突然增大,甚至超过压桩能力,使压桩机上抬。此时可以最大的压桩力作用在桩顶后,采用停车“进一进”的方法,使桩缓慢穿过砂层。如果有少量桩确实不能沉达设计标高,如已接近,可以截除桩头,继续基础承台的施工。

#### 4. 桩架倾斜

当压桩阻力超过压桩能力,或者由于平衡重来不及调整,而使压桩架发生较大倾斜时,应立即采取停压措施,以免造成断桩或倒架事故。

## 第二节 桥头及桥梁伸缩缝处跳车的防治

### 一、产生原因

#### 1. 桥头跳车

桥头跳车台阶的产生和形成是多方面的,包括地基地面条件、填料、施工材料以及设计、施工方面的诸多原因。

##### (1) 桥台及台后填方地基的受力与沉降变形分析

我国地域辽阔,作为桥台及台后填方地基的地层岩性状况也千差万别,如基岩(岩浆岩、沉积岩、变质岩)地基、黄土地基、软土地基、冻土地基、盐渍土地基、膨胀土地基等等,

除基岩(指次坚石以上的岩类)地基外,其它类型的地基一般情况在桥台及台后填方的作用下,均要发生不同程度的沉降或竖向固结变形,所以对地基必须进行加固处理设计,如采用扩大基础或桩基础等,以保证地基的稳定性。

桥台及台后填方的地基一般情况为同一性质或同一类型的地层,但从目前设计情况看,仅对桥台地基进行加固处理设计,而对台后填方路段下的地基一般不进行加固处理设计。桥台和台后填方是两个性质不同的结构体,虽然桥台作用在地基上的压力大于台后填方,但由于桥台基础一般都进行了加固处理,所以它一般不发生竖向沉降变形。而台后填方的地基一般不进行加固,其竖向沉降变形都远大于桥台下的地基变形,由于地基的这种差异变形,反映到上部路面,就出现了桥台和台后填方段的差异沉降变形。

### (2) 台后填料受渗水侵蚀及变形分析

桥台一般由浆砌片石和钢筋混凝土砌筑,在桥台和台后填方之间或者锥坡部位,大气降水易沿路面或锥坡体(锥坡体的压实度较难达到要求)下渗,下渗水对桥台一般不产生破坏作用,但是对土类填料,易产生侵蚀和软化,特别对于填方体压实度不够,更易产生侵蚀和软化,降低强度,从而导致填方体变形。对砂砾石类填料,从填方横断面看一般填方体中部为砂砾石,两侧为土类,这种结构只利水的下渗,而不利水的横向排泄。对不加固的地基来讲,填方体中部压力大,向两侧边坡压力逐渐减小,从而使地基产生凹形沉降变形,当水沿砂砾石下渗到地基后,下渗水不易快速排泄,从而软化地基,并加速地基的变形。

### (3) 台后填料压实分析

靠近桥台处填方体的压实度很难达到设计规范要求,这也是一直围绕设计和施工的难点。目前在设计上和施工中主要采用强夯、人工夯实、填筑砂料等方法 and 措施。对于轻型桥台,重型压路机靠近桥台进行压实,特别是振动压路机可能破坏桥台的结构,而对于“U”型桥台,重型压路机难以靠近,从而使靠近桥台部位的填方土体不易达到设计和压实度要求,造成桥台与台后填方差异沉降变形。

### (4) 桥头跳车台阶产生的主要原因

通过以上分析,可得出产生桥头跳车台阶的主要原因有:

#### ① 地基强度不同。

桥涵、通道与路基大都是同年平行进行施工的,桥涵是刚性体,其地基强度一般都有较高的要求,并进行加固处理,沉降较小或不沉降(岩石地基)。而台后填方段地基未进行加固处理,从而使桥台和台后填方产生差异沉降变形,以致形成台阶。

#### ② 设计不周。

设计人员有时对施工过程如何便于碾压考虑不周,对于填料的要求不严格,台背排

水考虑欠佳。桥涵结构物两端的路堤,由于过水、跨线或通道的要求,一般填土都较高,低的3m左右,高的可达10m或更高,除了过水的桥涵两侧路堤往往受水浸淹,地基条件也较差,设计上对路基断面结构和边坡防护上有所考虑外,其他多数情况对高路堤设计上并无特别的要求,如压实度等指标均与一般路堤无异。但由于路堤较高,在填筑以后受到自重和行车荷载的作用,路堤填土必然要产生竖向变形值。

### ③台后填料不当。

施工时对桥台台后的回填土未能慎重考虑,施工人员用料不当、控制不严,未能达到设计要求。但需特别指出,施工不良比材料不良更易造成构造物台后填料的下沉。

### ④台后压实不足。

施工时工期工序安排不当,以致桥头填土处于工期末期,被迫赶工,不能很好地控制台背填土的压实度,致使填料压实度不满足设计和规范要求,使填方体产生竖向固结变形,形成较大的工后沉降,在台背与路基连接部造成沉陷形成台阶。

### ⑤地基浸水软化。

软土地基、湿陷性黄土地基浸水等造成路基沉降。

### ⑥桥台伸缩缝的破损。

据上分析,形成桥头台阶的原因是多方面的,结构的差异、设计的不周和施工控制的不严、综合因素的作用导致了差异沉降的发生和发展。

## 2. 桥梁伸缩缝处跳车

桥梁伸缩缝处跳车台阶产生的主要原因是桥梁伸缩缝发生病害或损坏引起的。

### (1)桥梁伸缩缝的作用

众所周知,在气温变化的影响下,桥梁梁体长度会发生变化,从而使梁端发生位移,为适应这种位移并保持行车平顺,就必须设置桥梁伸缩装置。由此可见,桥梁伸缩缝的作用,在于调节由车辆荷载环境特征和桥梁建筑材料的物理性能所引起的上部结构之间的位移和上部结构之间的联结。桥梁伸缩缝装置是桥梁构造的一部分,如果设计不当、安装质量低劣、缺乏科学的和及时的养护,大部分桥梁会在桥梁伸缩缝处形成台阶,直接影响到桥梁的服务质量。

### (2)桥梁伸缩缝的使用与发展

在橡胶伸缩缝出现以前,小位移桥梁一般采用镀锌铁皮伸缩缝,这种结构的装置在伸缩过程中会形成沟槽,使桥面失去平整,使用寿命缩短。大中位移的桥梁一般采用齿口钢板伸缩缝,车辆通过时受冲击振动大,缝体容易损坏,且不能防水,效果差。60年代末期我国开始研制和试用橡胶伸缩缝产品,产品有空心板型和W型,这种伸缩缝只能适应梁端位移量为20~60mm的中小跨径桥梁,且容易发生胶条弹出现象而导致损坏。80年

代中末期我国开始生产使用板式橡胶伸缩装置,这种装置由氯丁橡胶和加劲钢板组合而成,是一种刚柔相结合的装置。其接缝平整,吸震性好,适应面加大,基本上能满足中小跨径桥梁的需要。90年代,在板式橡胶伸缩装置的基础上生产了BF伸缩装置,其本质是橡胶板和钢梳齿组合成的伸缩装置,与板式橡胶缝装置相比合理性有所提高。

90年代初,我国开始引进毛勒型钢伸缩缝装置,并进一步加以开发研究。到90年代中末期,开始大量生产和使用,此装置适用于所有大中桥梁的伸缩缝。毛勒型钢伸缩缝装置近几年来得到大范围推广使用,由于其结构形式和锚固形式大大改进,其合理性大大增强,普遍反映比其他类型装置先进、可靠。但发生病害损坏的现象却也不少。针对位移量小的中小跨径桥梁,近几年又引进了TST弹性性与碎石填充型伸缩装置,虽大量推广,但仍存在一些问题。

### (3) 桥梁伸缩装置损坏原因分析

目前,工程上常常采用的伸缩装置有板式橡胶缝、BF缝、毛勒型钢缝以及TST弹性体伸缩装置。

板式橡胶伸缩装置及BF缝装置是使用最多、最广泛的伸缩装置,但损坏也比较严重,这种损坏首先表现在过渡段的混凝土破坏,继而锚固系统破坏,最后整个伸缩装置破坏而无法使用。

对目前常用桥梁结构而言,伸缩装置的锚固系统很难准确地预埋在梁中,甚至不能预埋,大部分锚固在铺装层混凝土中。一般的桥梁铺装厚度为8~12cm,最厚也不超过15cm。板式橡胶伸缩装置和BF缝装置锚固系统由于缝本身厚度的影响,锚固深度一般只有5~7cm,最多不过10cm。伸缩装置一般设计要求过渡段混凝土采用C28、C38甚至更高的高标号混凝土,由于混凝土厚度太薄、体积太小,还加上预埋件的位置干扰,施工难度大,过渡段混凝土的锚固作用实际上大打折扣,预埋件的锚固质量也大受影响。桥面通常采用沥青混凝土料铺装,往往伸缩装置安装在先,桥面铺装在后,沥青面层和过渡段混凝土之间很难铺平,加上刚柔相接,容易产生台阶。车辆通行振动产生冲击使伸缩装置锚固系统和过渡段混凝土受力瞬时加大,而由此产生的振动又是高频振动,在反复的车辆瞬时荷载作用下,伸缩装置锚固混凝土不能保持弹性而破坏,锚固装置在反复动荷载震动下产生变形并与混凝土剥离,最终全部破坏。

桥梁的设计施工质量也是影响伸缩装置的使用寿命的一个主要原因。从设计上看:设计工程师在伸缩缝设计过程中只注重计算桥梁的伸缩量,并以此进行选型,而往往对伸缩装置的性能了解不全面,忽视了产品的相应技术要求。从施工上看:伸缩装置安装是桥梁施工的最后几道工序之一,为了赶竣工通车,施工人员对这道细活难活易疏忽大意,施工马虎,不按安装程序及有关操作要求施工。另外,伸缩装置安装后混凝土没有达

到强度就提前开放交通,致使过渡段的锚固混凝土产生早期损伤,从而导致伸缩缝营运环境下降。另外,伸缩装置的受力复杂,而与之密切相关起决定作用的锚固系统却不尽合理,锚固混凝土太薄,强度很难达到设计要求,极容易损坏。

#### (4)桥梁伸缩装置破损的原因

桥梁伸缩装置由于设置在梁端构造薄弱的部位,直接承受车辆荷载的反复作用,又多暴露于大自然中,受到各种自然因素的影响,因此,伸缩装置是易损坏、难修补的部位。伸缩装置产生破损的原因是多方面的,主要有:

##### ①设计不周。

设计时梁端部未能慎重考虑,在反复荷载作用下,梁端破损引起伸缩装置失灵。另外,有时变形量计算不恰当,采用了过大的伸缩间距,导致伸缩装置破损。

##### ②伸缩装置自身问题。

伸缩装置本身构造刚度不足,锚固的构件强度不足,在营运过程中产生不同程度的破坏。

##### ③伸缩装置的后浇压填材料选择不当。

对伸缩装置的后浇压填材料没有认真对待、精心选择,致使伸缩装置营运质量下降,产生不同程度的病害。

##### ④施工不当。

施工过程中,梁端伸缩缝间距没有按设计要求完成,人为地放大和缩小,定位角钢位置不正确,致使伸缩装置不能正常工作。这样会出现下列情况:由于缝距太小,橡胶伸缩缝因超限挤压凸起而产生跳车;由于缝距过大,荷载作用下的剪切力以及车辆行驶的惯性,会将松动的伸缩缝橡胶带出定位角钢,产生了另一类型的跳车。施工时伸缩装置的锚固钢筋焊接的不够牢固,或产生遗漏预埋锚固钢筋的现象,给伸缩缝本身造成隐患;施工时伸缩装置安装的不好,桥面铺装后伸缩缝浇筑的不好,使用过程中,在反复荷载作用下致使伸缩缝损坏。

##### ⑤连续缝设置不够完善。

为了减少伸缩缝,现在大量采用连续梁或连续桥面。桥面连续就需设置连续缝,目前连续缝的设置不够完善,致使连续缝破损,而产生桥面跳车。桥面连续缝处,变形假缝的宽度和深度设置得不够规范,不够统一,这也不同程度地影响着连续缝的正常工作。

##### ⑥养护不当。

桥梁在营运过程中,后浇压填材料养护管理不善,桥面没有经常进行清扫,导致伸缩装置逐渐破损。

##### ⑦桥面铺装的影响。

接缝处桥面凹凸不平,桥面铺装层老化等均可引起伸缩装置破损。

#### ⑧交通流量影响。

桥梁在营运过程中,车流量大、车速快、载重车辆多,巨大的车轮冲击力造成板式伸缩缝、橡胶伸缩缝的某些伸缩装置的部件破损、脱落、松动,有的甚至引起桥面破坏,严重影响行车安全。

总之,形成桥梁伸缩缝处跳车的原因是多方面的,设计考虑不周、材料不足、营运条件恶劣、施工管理不善和养护不当等诸多原因都可导致桥梁伸缩装置不同程度的损坏。

## 二、防治跳车的基本措施

根据目前我国公路修建中桥涵及桥涵两端路堤设计、施工的实际情况,以及桥梁伸缩装置设计选型和安装的具体情况,结合关于产生跳车原因的分析,跳车防治措施应该是综合的。

### 1. 桥头跳车防治措施

#### (1) 地基加固处理

为消除桥台和台后填方段的差异沉降变形,需对地基进行加固,尤其是特殊地基,如软土地基、湿陷性黄土地基、河流相冲击洪积物地基等更需进行特殊处理。

台后填方段的地基压力,一般小于桥台的压力,其次台后填方的高度一般情况下沿纵向(远离桥台)不断降低,即压力不断减小,所以在进行地基加固处理时,首先应了解地基的地层岩性情况,并取样做土的含水量、密度和剪切试验,对特殊地层如黄土和膨胀土还需做湿陷性等试验,从而确定地基沉降变形特性(固结变形计算),其次分段计算填方自重压力,根据具体的地层情况设计地基加固方案,使台后填方路段的地基沉降变形与桥台地基沉降变形保持一致,对不同的地层采用不同方法和措施。

#### ①软土地基。

软土属高压缩、大变形地基,对该地基首先应采用插塑料板、袋装砂井等超载预压等方法进行排水固结,其次根据填方路堤的压力计算,采用喷粉桩、挤密桩等进行加固处理。

#### ②河流相冲洪积物地基。

该地层分布广、类型多、相变较大,地貌一般为河漫滩,或一、二级阶地,该地基无论地层岩性条件,还是固结变形情况都优于软土地基,但由于该地基岩性和固结情况变化较大,在地基加固设计前,应做地质勘察和土工实验,计算固结沉降量和填方压力,在此基础上进行地基渐变加固处理。

#### ③黄土地基

黄土地基(除  $Q_2$  和  $Q_1$  老黄土外)主要特点是具有湿陷性。设计前应做地基土的湿陷性指标和压缩试验,在计算台后填方土体压力的基础上,采用同上的地基加固处理设计,但需注意防排水设计,防止地基产生湿陷。

### (2) 桥头设置过渡段

在路堤和桥涵结构物的连接段上,考虑结构的差异,设置一定长度的过渡段。根据具体情况和所采用的措施,过渡段可以分为两种:

#### ① 路面类型过渡。

桥涵两端路堤的施工,在一定长度范围(该长度可以考虑与路堤高度成比例)内铺设过渡性路面,待路堤沉降基本完成以后改铺原设计的路面,这种措施对水泥混凝土路面比较适合。

#### ② 搭板过渡。

设置搭板可以使在柔性结构路段产生的较大沉降通过搭板逐渐过渡至桥涵结构物上,车辆行驶就不致于产生跳跃。目前设计的搭板,长度从 3m 至 8m 不等。搭板的使用,在一段时间内效果尚好,但是在路堤一侧搭板搁置在路面基层上或特制的枕梁上,基层或枕梁的沉陷可能在该处形成凹陷,还有导致搭板滑落的。鉴于此,施工时还需进行特别加固,在搭板的端部设置宽 0.4m、深达 1m 的水泥稳定砂砾大枕梁,这样使用效果很好。

此处,在路堤与桥涵接缝处设置排水槽,避免或减少对路基、路面材料的冲刷和浸润,将会减少沉陷值和减弱冰冻的影响。

### (3) 台背填料的选择

设计及施工中,台背填料应在现场择优选。采用粗颗粒材料填筑桥涵两端路堤,或者设置一定厚度的稳定土结构层。

用粗颗粒材料作为路基的填料不仅改善了压实性能,使其易达到要求的密实度,而且对北方地区特别有利于减缓冻融的危害。设置稳定土的改善层能够使路基、路面的整体刚度有所提高,从而减少沉陷。国外台后填方采用轻质填料,其目的也是减小填方容重,减轻填方土体对地基的压力,提高地基的承载力和抗变形的能力。

在挖方地段的台背回填部位,因场地特别窄小,应选用当地的石渣、砂砾等优质填料(在湿陷性黄土地区宜用水泥、白灰稳定土),填料的施工层厚度,以压实后小于 20m 为宜。无论填方或挖方地段的台背填料,最好不要采用容易产生崩解的风化岩的碎屑,以免因填料风化崩解而产生下陷,这一点在土方调配时应予以重视。

在高填方的拱涵及涵洞与侧墙的相接部位,应尽量使用内摩擦角大的填料进行填筑,而且施工时应注意填料土压的平衡,不得发生偏压,以免造成工程事故。

#### (4) 台背填方碾压方法

施工过程中尽可能扩大施工场地,以便充分发挥一般大型填方压实机械的使用,认真施工,给以充分压实。为了便利大型压实机械的使用,当受场地限制时,可采用横向碾压法,以能使压路机尽量靠近台背进行碾压。对于压路机不能靠近台背时,采用小型压路机配合人工夯实、碾压,最终压实度满足设计要求。

在洞涵的翼墙周围特别容易产生因压实不足而引起的沉陷,给养护工作带来麻烦,应注意压实。

扶壁式桥台在施工时很可能使用大型压实机械,这种情况下应与小型振动压路机配套使用,给以充分压实。

#### (5) 设置完善排水设施

填方的排水措施对填方的稳定极为重要,特别是靠近构造物背后的填料,在施工中及施工后易积水下陷,因此,设计及施工时,应保证施工中的排水坡度,设置必要的地下排水设施。另外也可以在桥台与填方段结合处及过渡段的路面下设置垫层,防止路面下渗水进入填方体。对中间为砂砾石填料、两侧为土类填料的填方体与加固地基的连接处做30~50m纵向集水管和每5~10m的横向排水管,以排泄填方体与加固地基之间的下渗水。

#### (6) 强化施工质量管理,提高桥涵两端路堤的施工质量

由于桥涵两端路堤所处的位置和特定条件使其有别于一般地段的路基质量要求,应采用相应的方法达到较高的质量。

桥涵端部路堤桥涵是两种不同性质的结构物,都有各自的设计施工要求,为了使沉降差尽量小一些,应该将该处路堤的压实要求在现有基础上有所提高。除了路基顶部土层可提高至98%或更高外,整个路堤的压实度都应提高。

为了使桥台填方达到要求的密实度,必须完善施工工艺、方法和强化施工质量管理,比如压实土层厚可以适当减薄以及增加压实遍数。为适应桥涵端部路堤施工场地窄小,压实区域形状不规则而工期又紧迫的特点,应使用专用的小型压实机械。

#### (7) 加强工程监理工作

监理应对台背填土施工的填料选择、压路机具的选择、填土厚度进行检查,分层验收,对排水情况应予以检查,严格执行工序验收制度。

为了防止形成桥涵端部路堤的沉降台阶,防止桥头跳车,除了对路堤的设计、施工予以改善以外,还要加强管理,提高路基碾压质量。

### 2. 桥梁伸缩缝处跳车防治措施

#### (1) 梁端特殊设计

梁端部要具有足够的刚度,以满足营运过程中反复荷载的作用。设计过程中要采用恰当的伸缩间距,以保证伸缩装置的正常营运使用。

### (2)合理选用伸缩缝装置

选用伸缩缝装置最主要的是伸缩装置缝本身的刚度和质量。我们所理想的伸缩缝装置必须满足下列要求:

- ①满足上部结构梁与梁之间和梁与台之间的位移;
- ②伸缩装置的锚固是牢固可靠、经久耐用的,能够抵抗机械磨损、碰撞;
- ③车辆行驶平稳、舒适;
- ④能防止雨水和垃圾渗入;
- ⑤安装方便、简单,易检查且便于养路工操作。

目前我国公路建设中采用的伸缩装置类型较多,常见的有板式橡胶缝、齿口钢板伸缩缝、西安 SD II—80 型伸缩缝、衡水 XF—80 仿毛勒伸缩缝、美国万宝伸缩缝、德国毛勒伸缩缝以及 TST 弹塑体与碎石填充型伸缩装置等。根据各种伸缩装置的使用状况及适应范围进行分析对比,选择采用最经济最合理的伸缩装置。

### (3)伸缩装置的安装

#### ①伸缩装置的锚固宽度。

需要规范伸缩缝预埋钢筋在梁(板)端部和桥台的锚固宽度。考虑到施工工艺的协调,伸缩装置的锚固宽度按 50cm 进行设置为适宜,桥台上宜采用背墙的宽度进行设置,这既方便了桥面板、现浇混凝土铺装层的施工,也使伸缩装置的稳定性得到了保障。

#### ②伸缩装置的锚固钢筋。

在预制梁(板)的端部和背墙内预埋伸缩装置锚固钢筋是在两种不同情况下进行的。一般设计给定的都是对称于桥宽中心,在梁(板)端部设置预埋钢筋,则钢筋在每片梁(板)内的预埋位置都会不一样,给施工增加了难度,因此锚固钢筋应以对称于每片梁(板)的中心进行设置,这点在设计中要充分考虑。

施工中要保证锚固钢筋的作用。仅在浇筑 8~10cm 厚的桥面板混凝土时进行设置是不可取的,这实际上没有让伸缩装置的定位角钢牢固地与梁(板)和背墙混凝土联结成整体,形成不稳定隐患,需要施工中认真对待。

#### ③伸缩装置的定位角钢

伸缩装置的定位角钢一定要依据安装时测定出的气温、计算伸缩缝的伸缩量来调整两块定位角钢之间的距离,并按桥面高度将定位角钢焊接到预埋钢筋上,这样严格控制了缝距。对于伸缩缝的间距,多持有宁小勿大的倾向,是万万要不得的。

定位角钢附近的混凝土,在施工中振捣比较困难,死角和钢筋密集的部位,应加强人

工插捣。

#### (4) 连续缝的设置

连续缝的宽度按桥的设计跨径和梁(板)的设计长度之差值进行设置,30m 组合 T 梁连续缝宽 6cm;各种板桥连续缝宽 4cm;弯道上的桥在盖梁上设置楔形块调整桥面曲线,楔形块部位的连续缝按两条缝进行设置,每条缝宽不宜小于 4cm,通常设计缝宽 2cm 偏小。

桥面连续缝外,变形假缝的宽度和深度必须规范、统一,缝的宽度和深度宜按  $0.5\text{cm} \times 2.5\text{cm}$  的锯缝进行设置,这样方便施工。

#### (5) 锚固区混凝土的浇筑

桥面行车道混凝土铺装应该同伸缩装置锚固区的混凝土同时进行浇筑,不允许在该部位及整个桥面上留有施工缝。

#### (6) 加强伸缩缝的养护

伸缩装置在营运过程中必须加强养护,为伸缩装置创造良好的工作环境,使其正常工作。

#### (7) 完善连续缝的设置

目前连续缝的设置不够完善,需从设计上进行改进。

##### ① 增设镀锌铁皮

连续缝处通常采用涂两层沥青,于中间铺设一层油毛毡(简称二油一毡)或涂两层乳化沥青,于中间铺设一层土工布(简称二油一布)。这样施工中就存在一些需要解决的问题:

- a. 在铺设桥面混凝土时,缝顶部位上的油毛毡、土工布容易下挠,甚至胀裂;
- b. 混凝土在插捣中,油毡容易被戳破;
- c. 混凝土会存在振捣不密实的问题。

为解决上述问题,需在二油一毡或二油一布底部增加设置一块宽度为 50cm 的镀锌铁皮。

##### ② 调整上部结构部分钢筋的设置。

对预应力 T 梁封锚顶面部分钢筋需要适当调整,以不伸出顶面为原则。否则,伸露出的钢筋会妨碍连续缝上二油一毡或二油一布和镀锌铁皮的设置。

##### ③ 二油一毡、二油一布的设置宽度。

二油一毡、二油一布的设置宽度在设计中需要文字说明交待清楚,宽度宜控制在 50cm 左右。

##### ④ 轻质包装材料不宜使用。

连续缝内填塞轻质包装材料,主要是为了衬托油毛毡或土工布不下挠和不被胀裂(实际上难以达到预期的效果)。该材料种类繁多,且无桥梁专用的产品,施工中使用的很混乱,掩盖了梁(板)缝内的杂物,甚至是坚硬块件。由于接缝中增设了镀锌铁皮,优化了二油一毡或二油一布的使用效果,轻质包装材料可以不用。

### 三、产生跳车台阶的补救措施

桥端头台阶已经产生,跳车现象随之发生,需要我们考虑的是,应该采取什么措施进行修复补救。

#### 1. 桥头路车台阶的修复补救措施

当路面铺装以后产生沉降时,在桥涵构造物两端形成台阶,据调查所形成的台阶高度一般小于20mm时,对车速的影响不太严重,可以不予修复。当台阶高度逐步增大时,对跳车的影响将大为加剧,应予修补。

##### (1) 更换填料

个别桥台背部因场地狭小、赶工填筑,填料压实度不足,需对桥涵两端10m范围内的台背填料进行换填处理。采用抗水侵蚀性好的填料,如半刚性填料,砂石填料等,以改善填料的水稳性。

##### (2) 采用半刚性基层

路基上部0.5~0.8m厚的路基土应用水泥或石灰稳定处理,也可采用二灰稳定碎石进行填筑,以期提高整体强度。

##### (3) 加铺沥青混凝土

为使沉降后的路面与缓路段端部衔接顺适,应对端部开挖处理,一般下挖15~20mm为宜。错位沉降的修被可用热拌沥青混凝土加铺,以求增大与原路面的粘结能力,加铺层的强度也比较稳定。

无论采用何种措施,修补长度应视台阶高度、形状而异,一般为10~15m为宜,缓和段的坡度控制在0.5%以内。

#### 2. 桥梁伸缩缝的修复补救措施

桥梁在营运过程中,由于伸缩缝装置损坏至一定程度即会引起桥面跳车,因此对于损坏的伸缩缝装置应及时进行修复、更换,以免造成更大的损失。

##### (1) 伸缩缝构件局部维修、更换

伸缩缝装置在损坏初期只是局部构件不能正常工作,虽对行车影响不大,但也应及时维修,更换个别已损坏的部件,以满足伸缩缝装置正常工作的要求。

##### (2) 伸缩缝装置修复更换

伸缩缝装置破损已引起桥面跳车,局部维修更换个别部件已不可能时,即应更换伸缩缝装置。

根据我们对伸缩缝的要求,从当前可供使用的伸缩缝装置中科学地比较、选型,同时结合旧桥更换的特点,旧桥伸缩缝装置的类型、伸缩装置适用范围、以往的经验、使用的情况、伸缩缝装置损坏的程度以及施工条件能否阻车等多方面因素综合考虑,选出适合修复更称的伸缩缝装置进行复更换。

对伸缩量小于 50mm 的大、中桥推荐使用 TST 弹整体与碎石填充型伸缩装置或西安 SDⅡ—80 型伸缩装置,对特大桥推荐使用德国毛勒缝装置(在能阻车的前提下)。

### (3) 修复更换伸缩缝装置的原则

修复更换伸缩缝装置应以经济合理为原则,即能利用的尽量利用,完全不能利用的彻底更换,以此达到我们修复更换的目的。

无论是桥头还是桥梁伸缩缝处跳车现象出现后都应及时采取补救措施,进行修复。保证公路畅通是我们的最终目的。

## 四、桥头、桥梁伸缩缝处跳车台阶的修补标准

桥头、桥面跳车现象是世界各国公路都存在的问题。由于各种因素的影响和作用,公路在建成使用以后尚无法完全避免台阶的出现,因此必须加强定期维修养护。那么在台阶达到多大时修补是比较合适的呢?为此,必须确定一个标准。

### 1. 桥头跳车台阶修补标准

国内外在研究高等级公路路堤沉降时,对软土地基上的公路提出容许工后沉降的标准,即指铺筑路面后至大修年限的容许剩余沉降值。对相邻人工构造物的路堤也提出了台阶标准,如重庆公路所提出 20 年的工后容许沉降值为 10~20cm。显然,为了维持公路的良好使用质量,实际上,必定是在达到远小于上述数值的某一沉降值时就要进行多次的维修,因此,应该定出一个合适的维修标准。考虑到桥头台阶是间断非连续的,行车间隔距离又稍长的情况,以及修补的频率,尤其是维修费用问题,其标准亦在 1cm 以上。根据我们初步的测试分析,桥头台阶对车速的影响,一般在台阶高度为 2cm 时产生较为明显的突变。而当台阶高度达到 4cm 时车辆行驶明显减速,其减速幅度平均可达 9km/h 左右,对行车产生显著影响。因此,修补标准确定:在桥涵端部路堤的沉降台阶达到 2~4cm 时即应进行修补养护。具体数量,对沥青路面可以考虑采用低限,对水泥混凝土路面可以略为放宽而采用高限数值。

### 2. 桥梁伸缩缝修补标准

桥梁伸缩缝装置的损坏导致桥面形成数个高低不一的台阶,此类台阶与桥头台阶还

有差异。桥头台阶是单一的台阶,而桥面台阶在每一伸缩缝处是间距在 20~50cm 的两个台阶,每座桥又有数条伸缩缝,因此桥面台阶的存在对车速的影响比桥头台阶影响更为显著。

由于诸多原因的存在,伸缩缝装置的损坏是难免的,桥面跳车现象也是客观存在的,那么,修复标准是什么呢?根据台阶对车速的影响,台阶达到 2~4cm 时即应进行修补养护。对于桥梁来说,台阶达到 1~2cm 时伸缩缝装置开始局部损坏,不能正常工作。台阶倘若达到 2~4cm 时伸缩缝装置就基本全部损坏,不能工作。因此桥面跳车台阶修复标准确定:在桥面伸缩缝处桥面台阶达到 1~2cm,即伸缩缝装置开始局部损坏时即应进行修复。由此也可以看出伸缩缝装置的修复工作是经常性的、不间断的。这就需要我们加强日常维修保养工作,保证伸缩缝装置处于正常工作状态。

总之,桥头、桥梁伸缩缝处跳车台阶问题是个比较复杂的问题,牵连到设计、施工、养护各个方面,因而要解决这一问题也需要通过严密的设计、认真的施工才能解决或缓解这一病害。

### 第三节 桥面质量通病及防治

#### 一、桥面水泥混凝土铺装层开裂

(1)现象 桥面防水层上的水泥混凝土铺装层,在通车后一至数月后,首先在车轮经常经过的板角产生裂缝,并很快发展为纵横交错裂缝,一至二年发生严重碎裂,以至脱落形成坑洼。

(2)危害 桥面水泥混凝土开裂,使水由裂缝浸入铺装层,甚至会浸入上部结构的梁板,当桥面及梁、板的钢筋受到裂缝浸入水作用而锈蚀;为碱骨料反应提供水源;铺装脱落出坑,造成车辆跳车,加速桥面的进一步破坏。

(3)原因分析:

①桥面平整度不好或桥面伸缩缝附近不平整,使车辆行驶产生较大冲击。

②桥面防水层,由于与主梁顶面和桥面水泥混凝土铺装层间联结不好,将铺装层与主梁分为两个独立体系,在车辆荷载作用下变形不一致,形成桥面铺装层与主梁顶面间的空隙,铺装层 10cm 厚,强度低,板角及桥缝处的应力集中形成板角裂缝。

③主梁刚度小,变形大,加剧了裂缝发展的速度。

#### (4) 治理方法。

##### ① 设计变更。

A、将桥面铺装水泥混凝土层,按弹性地基上的水泥混凝土路面设计,双层配筋,并将铺装层由原 10cm 加厚至 18cm,如采用钢纤维混凝土,可减至 15cm 厚。

B、将桥面铺装层改为沥青混凝土,可同时消除原水泥混凝土铺装的干缩及温度裂缝。但要解决好防水层与沥青混凝土磨损层的联结。

##### ② 可采取下述施工措施,减轻或延缓开裂:

A、变单层混凝土桥面铺装,为上层沥青混凝土,下层水泥混凝土的双层做法:下层水泥混凝土结构层厚 7cm,内设单层  $\phi 8 \sim \phi 12$  钢筋,且纵向分条,横向分块,每块尺寸  $5.33 \times 6.10$  (m),施工按水泥路面纵向分条施工,横向采用切缝。上层为 5cm 厚的沥青混凝土磨损层。使用效果是出现局部裂缝,未发生破损。这是北京四环路健翔立交桥主桥桥面的施工经验,可供参考。

B、桥面防水层,由三油二布改为 GYL 涂膜防水新材料,即为改性阳离子乳化沥青胶乳涂膜防水新材料。GYL 涂膜防水材料是水乳性材料,施工工艺简单,对基层干燥程度要求低。是一种适于涂刷的质薄弹性好的材料,没有卷材防水材料的搭接问题。防水层采用加入橡胶沥青混合乳液防水剂的砂浆,且涂层薄而均匀,利于减少混凝土铺装层裂缝。在广渠门立交桥东转盘桥面,采用的水泥混凝土铺装层,由于使用 GYL 涂膜防水材料,和铺装层内加  $\phi 8$  钢筋网的方法,使混凝土裂缝大大减少。

##### ③ 严把质量。确保桥面平整度和桥面伸缩缝与两侧桥面的平顺度,减少车辆冲击力。

## 二、沥青混凝土铺装壅包

(1) 现象 桥面沥青混凝土经过通车后一段时间,由于刹车或减速产生的水平力形成突起或波浪状的起伏。

(2) 危害 使桥面的平整度变坏,车辆行驶舒畅性的恶化。

(3) 原因分析:

① 沥青混凝土面层,由于局部与路面基层的粘结力消弱,造成结合不牢,或沥青混凝土的热稳定性差而形成的。

② 桥面板面铺筑沥青混凝土前潮湿或有水,桥面板(如钢梁时)变形大。

(4) 预防措施:

① 严格控制沥青混合料的油石比和石料级配,确保其符合设计要求的马歇尔稳定度的流值。

② 做好桥面柔性防水层的施工,提高贴铺质量,并在铺筑沥青混凝土前,浇好粘层

油,使其与桥面防水层牢固粘结。

(5)治理方法:

①属于基层原因引起的壅包,可用挖补法先处量基层,然后再作面层。

②由于面层沥青混凝土热稳性不好,或油石化不适,造成的壅包,可用挖补法修补,也可在高温季节,将壅包铲平。

### 三、伸缩缝与两侧路面衔接不平顺

(1)现象:伸缩缝高于、或低于其两侧路面,超过5mm,造成衔接不平顺现象或伸缩缝两侧不等高。

(2)危害:使车辆经过时发生跳车。

(3)原因分析:

①钢板滑板伸缩缝上层钢板安装时标高不准,一般滑动端的钢板高于固定端钢板,造成高于或低于路面标高现象。

②滑板伸缩缝的滑动板因车辆冲击产生变形或前缘上翘。

③齿形钢板伸缩缝由于钢板与主筋相连焊缝脱裂,钢板变形或上翘。

④伸缩缝的钢板连同角钢松脱,其所埋范围内的水泥混凝土桥面层破裂,造成了伸缩缝两侧出现凹坑,造成伸缩缝附近不平顺。

(4)预防措施:

①伸缩缝下埋角钢要严格控制其符合设计标高,尽量缩小滑动伸缩缝滑动钢板的宽度,防止滑动钢板前缘的上翘。

②加强上层钢板与其下主梁的连接,保证焊接处双侧焊以便增加焊缝长度。采用厚度在30mm以上的钢板,防止在车辆冲击下产生变形。

③采用连续桥面新技术,减少桥面伸缩缝的个数,并采用新型大变形量防水伸缩缝,如TS伸缩缝(北京西厢工程桥梁采用),毛勒伸缩缝(京津塘高速路桥梁采用)。新型伸缩缝由工厂预制和组装的,可分段在现场连接安装。根据安装温度调整好安装尺寸,然后将调整好的伸缩缝吊装就位,再将伸缩缝的锚固筋,与桥面预留槽口内的预埋钢筋相焊接,采用高于桥面混凝土一级的钢纤维混凝土将伸缩缝槽口浇注密实。

④伸缩缝装置的安装采用后安装法。即铺路时,将伸缩缝装置位置按路面铺过去,碾压平整、密实。然后,按伸缩缝装置加混凝土保护带的宽度,将该部分路面结构切、挖去,再进行伸缩装置安装、焊接,浇注混凝土保护带。北京首都机场高速路的桥头伸缩缝,北京市西北三环路的立交桥梁的伸缩缝,均按后安装法安装的,使用效果表明,这种方法能够消除桥头跳车的现象。