

第一章 刚架桥的主要类型及构造特点

第一节 概述

1.桥跨结构（主梁）和墩台（支柱）整体相连的桥梁叫做刚架桥。

2.受力特点：

（1）由于桥墩和桥台之间是刚性连接，在竖向荷载作用下，将在主梁端部产生负弯矩，减少跨中的正弯矩；支柱除承受压力外，还承受弯矩；刚架桥在竖向荷载作用下，一般都产生水平推力。

（2）刚架桥大多做成超静定的结构型式，故在混凝土收缩、温度变化、墩台不均匀沉降和预应力等因素的影响和作用下，会产生附加内力（次内力）。在施工过程中，结构体系转换和徐变也会引起附加内力。附加内力有时可占整个内力很大的比例。

3.刚架桥的结构特点：外形尺小，桥下净空大，桥下视野开阔，混凝土用量少。但是钢筋用量较大，基础造价也较高。

第二节 刚架桥的类型

1. 门式刚架桥：腿和梁垂直相交呈门架形。

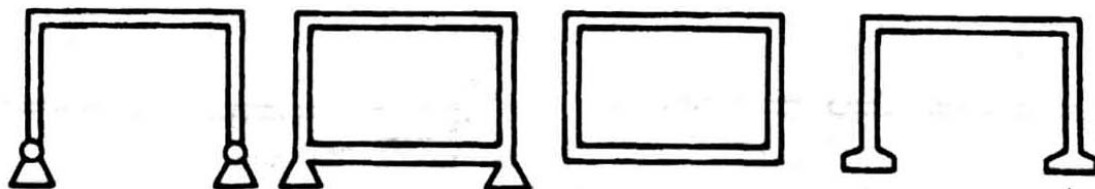
（1）门式刚架桥的类型

①单跨门架桥。

②双悬臂单跨门架桥。将梁的两端悬伸至门腿之外，在悬伸端加平衡重或在悬伸端和腿脚间设置预应力拉杆，可使梁的支承截面产生较大的负弯矩，以降低梁的跨中正弯矩和挠度，有利于修建跨线桥。

③多跨门架桥。

④三跨两腿门架桥。



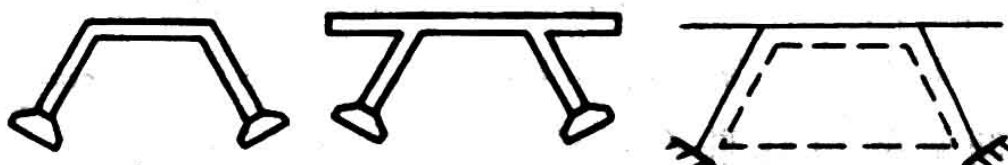
2. 斜腿刚架桥：由一对斜置的撑杆与梁体固结后来承担车辆荷载的桥梁称斜腿刚构桥。

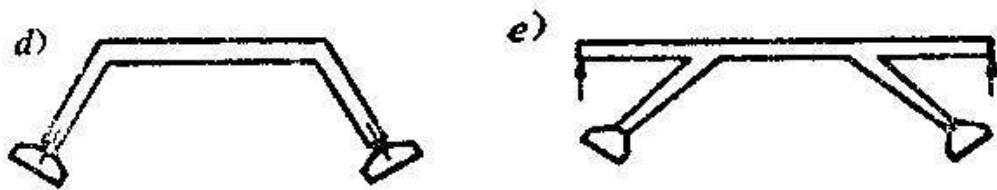
其特点为：

①其压力线近于拱桥，比门式刚架的立墙或立柱受力更合理。

②斜腿以受压为主，主梁跨度缩小，支撑反力有所增加，而且斜柱的长度也较大。

③跨越能力强。





3. V形墩刚架桥:为减少支柱肩部的负弯矩峰值,将支柱做成V形墩形式。内部高次超静定,外部接近连续梁。

4. 带拉杆刚架桥:为方便采用悬臂施工,并且减少跨中正弯矩和挠度值,做成两端带拉杆的结构形式,施工时可在端部临时压重。

5. T形刚构:T形刚构桥是一种具有悬臂受力特点的梁式桥,最早采用钢筋混凝土结构。由于钢筋混凝土梁式结构承受负弯矩,顶面裂缝不可避免,因此钢筋混凝土T形刚构不可能做成很大的跨径。而预应力混凝土T形刚构可直接采用悬臂施工法,从20世纪50年代产生以来,预应力混凝土T形刚构得得了迅速发展。

(1) 带铰的T形刚构桥:超静定结构。

优点:剪力铰是一种只传递竖向剪力而不传递纵向水平力和弯矩的连接构造。从结构整体受力和牵制悬臂端的变形分析,剪力铰对T形刚构桥的内力起到有利作用。

缺点:由于温度变化,混凝土收缩徐变和基础不均匀沉陷等因素的作用会使结构内产生附加内力;有时施工中还要强迫合拢等;剪力铰不仅结构复杂、用钢量多,造成费用增加,而且铰和梁的刚度差异引起结构变形不协调,致使桥面不平顺,导致行车不舒适。上述种种缺点限制了带铰T形刚构桥的应用范围。

(2) 带挂孔的T形刚构桥:一种静定结构。

优点:受力明确,构造简单,特别是挂梁与多孔引桥简支跨尺寸相同时,更能加快全桥施工进度,从而获得更高的经济效益。虽增加了牛腿构造,但免去了剪力铰复杂构造。

缺点:除桥面伸缩缝多,对高速行驶不利外,在施工中还增加预制与安装挂梁的机具设备。

第三节 构造特点

一. 一般构造

1. 主梁截面形式

(1) 等截面

(2) 等高变截面

(3) 变高度。变高度主梁的底缘形状可以为曲线形、折线形、曲线加直线形等,主要根据主梁内力的分布情况,按等强度原则选定。在下缘转折处,为保证底板的强度,一般宜设置横隔墙。

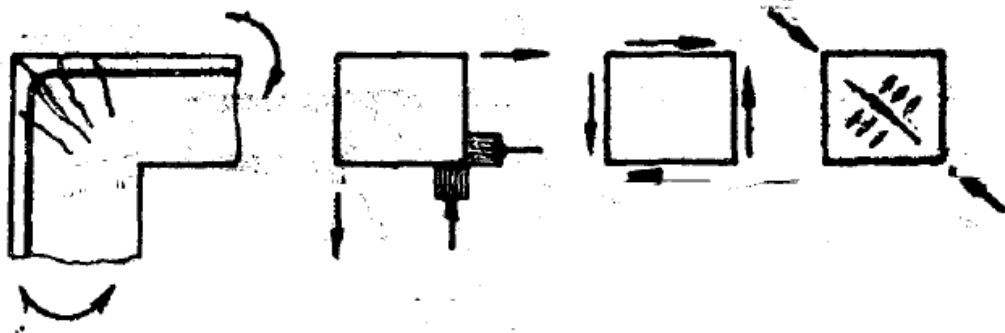
2. 支柱形式

(1) 薄壁式

(2) 立柱式:分为单柱和多柱

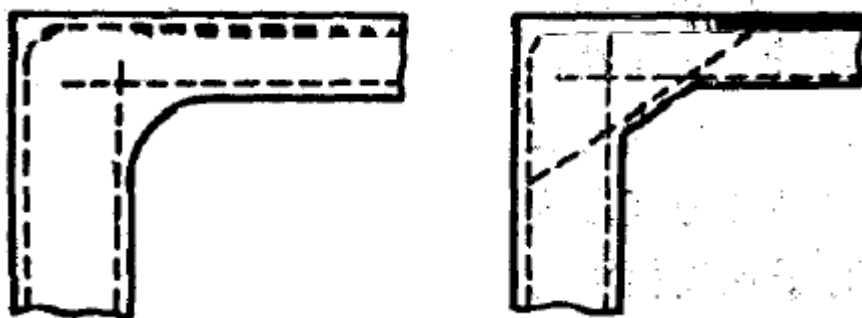
二. 刚架桥的节点构造

1. 刚构桥的节点指立柱与主梁相连接的部位,又称角隅节点。该节点必须具有强大的刚性,以保证主梁和立柱的可靠连接。角隅节点受力如下图所示:



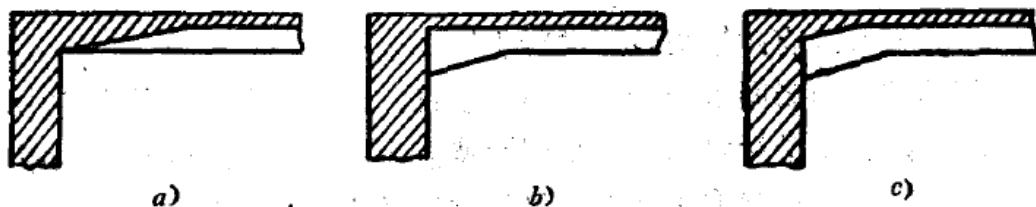
2.

(1) 板式刚架，可在节点内缘加设梗腋。



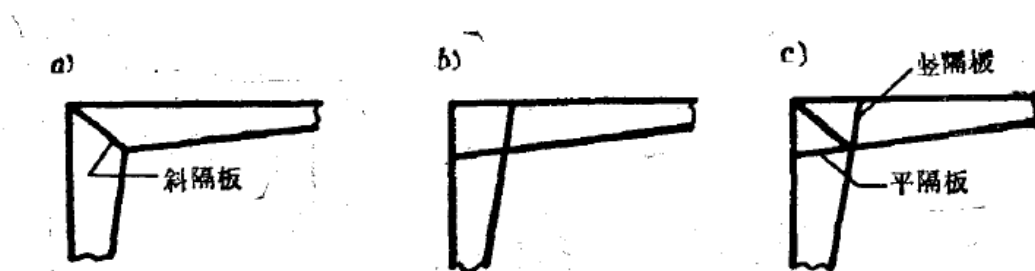
(2) 主梁为肋式的刚架，可以采用如下图的方式加设梗腋。

- a) 仅在桥面板加设梗腋
- b) 仅梁肋加设梗腋
- c) 两者都加设梗腋

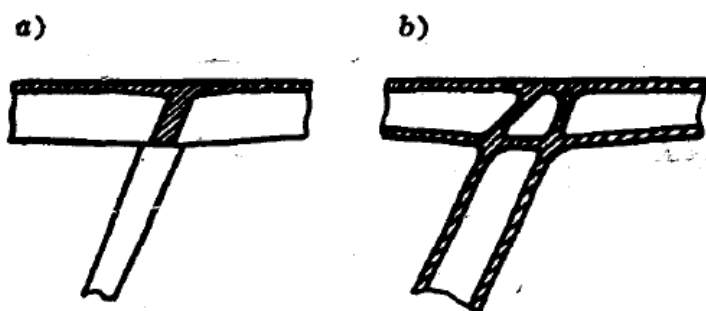


(3) 主梁和立柱都是箱型截面的刚架，可以采用如下图的方式加设梗腋。有时为使节点刚度强大，简化施工，也可将它做成实体。

- a) 仅在箱型截面内设置足够厚度的斜隔板；斜隔板传力直接，施工简单，但钢筋布置不如 b)、c) 方便。
- b) 设有竖隔板和横隔板，传力间接，受力情况较差，但构造和施工较简单。
- c) 兼有斜隔板、竖隔板和横隔板，节点刚强，布置主筋较方便，但施工麻烦。



(4) 斜腿刚架桥的节点角隅根据截面型式不同，可以做成如图两种型式：



3. 隅节点的配筋

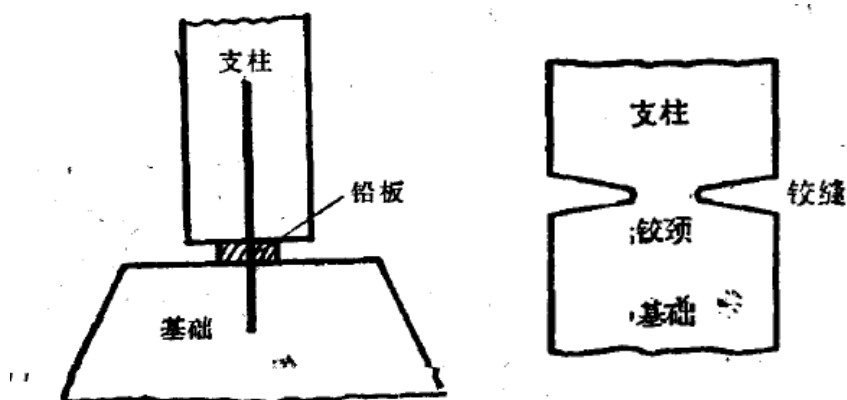
(1) 对于普通钢筋混凝土，一定要有足够的连续钢筋绕过隅节点外缘，否则，外缘混凝土会由于受拉会产生裂缝；对于受力较大的节点，在对角力的方向要设置受压钢筋，在和对角力垂直的方向要设置防劈裂钢筋。

(2) 对于预应力混凝土刚架桥，与隅节点相邻截面的预应力钢筋宜贯穿隅节点，并在隅角内交叉后锚固在梁顶和端头上。预应力钢筋锚头下面的局部应力区段尚应设置箍筋或钢筋网，用以承受局部拉应力。

(3) 对于加设梗腋的隅节点，要设置与梗腋外缘相平行的钢筋。

三. 铰的构造

1. 铅板铰就是在支柱底面与基础顶面之间垫的铅板，中设销钉，销钉的上半截伸入柱内，下半截伸入基础内。如下图所示：



2. 钢铰支座一般为铸钢制成，其构造与桥梁固定支座和拱桥支座相同。

3. 混凝土铰就是在需要设置铰的位置将混凝土截面骤然减小（称为颈缩），使截面刚度大大减小，因而此处的抗弯能力很低，可产生结构所需要的转动，形成铰的作用。

第二章. 刚架桥的内力计算

第一节. 刚架桥的计算原则

一. 基本原则和假定

目前，超静定结构体系的内力，仍按在运营荷载作用下，结构为弹性的假定进行计算。然后用计算得到的内力进行截面验算。在进行刚架桥的内力计算时，

可遵循以下基本假定：

1. 计算各式的轴线取支柱厚度的中分线和平分主梁跨中截面高度的水平线。对于截面高度或厚度变化较大的刚架桥，则以各截面高度中分点的连线作为计算各式的理论轴线。

2. 计算截面包括全部混凝土截面（包括全拉区），不考虑钢筋。对于 T 形和箱形截面，不论其顶板和底板厚度如何，均应全部计入计算截面。

3. 计算变位时，一般可略去轴向力和剪力，仅计弯矩的影响。但在计算张拉力作用所产生的次内力时，则必须计入轴向力对变位的影响。

4. 当采用变截面的主梁和支柱时，如果在同一构件中最大截面惯性矩超过最小截面惯性矩的两倍时，则应考虑此项变化的影响。

他地方大得多，可视为刚性区域；

5 当刚架奠基于压缩性甚小的土壤中时，支柱底端可认为是固定的。若刚架奠基于中等坚实的土壤时，则仅在下列情况下，支柱底端可认为是固定的：即当基础有足够大的尺寸，致使基础底面一边的土压应力与另一边之比不大于三倍时。

6 关于混凝土的弹性模量 E_h ，根据规范来确定：截面刚度按 $0.8E_h I$ 计，其中惯性矩 I 的计算规定如下：

对于静定结构，不记混凝土受拉区，计入钢筋；

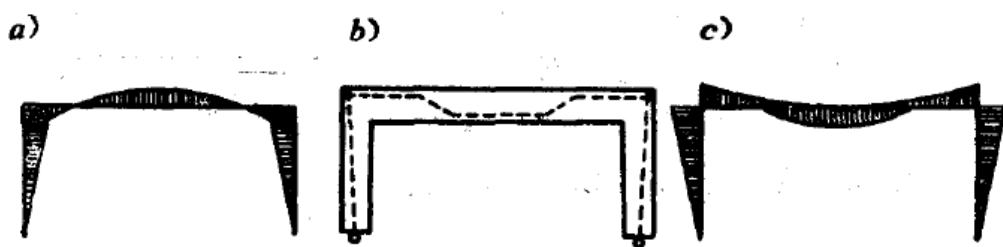
对于超静定结构，包括全部混凝土截面，不计钢筋。

二. 垂直荷载作用下的内力计算

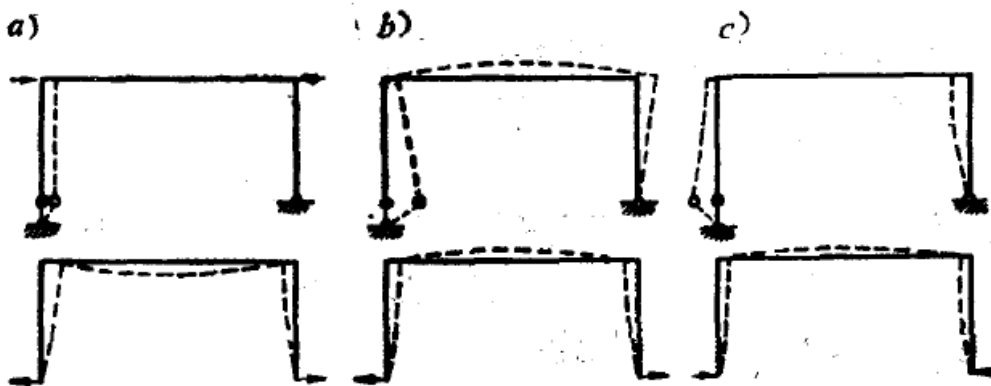
有关刚架桥在垂直荷载作用下的内力计算可参阅或使用有关的计算机程序计算。

三. 预应力作用所产生的次内力的计算

对于超静定的刚架桥，预应力的作用将引起次反力，产生次内力。如图所示的铰支门形刚架桥，其预应力的合力线如图 b) 所示，图 a) 所示为预应力产生的偏心弯矩。



当主梁承受轴心预应力时，产生如左图 a) 所示的变形；当主梁承受预应力偏心矩时，变形图如下图 b) 所示。可见，他们均引起向外的水平次反力，起着抵消预应力的作用。另外当支柱承受预应力偏心弯矩时，会产生图 c) 的变形，也引起支承处的水平反力。



此时，由于预应力作用所引起的次反力为：

$$R \cdot \delta_{RR} + \Delta_{Ry} = 0 \quad (1)$$

式中： Δ_{Ry} 是预应力作用时，刚架基本体系沿水平反力方向的变位，计算公式为：

$$\Delta_{Ry} = \int \frac{\overline{M}_R M_y}{EI} ds + \int \frac{\overline{N} N_y}{EA} ds \quad (2)$$

沿刚架桥全部构件分段积分求和

$$\Delta_{Ry} = - \sum_{i=1}^n \frac{N_{byi}}{EA_{bi}} \Delta x + \sum_{i=1}^n \frac{y_{bi} M_{byi}}{EJ_{bi}} \Delta x + 2 \sum_{i=1}^n \frac{y_{ci} M_{cyi}}{EJ_{ci}} \Delta y$$

式中： N_{byi} ——主梁 i 截面所受预应力的轴向分力；

M_{byi} ——主梁 i 截面所受预应力的偏心弯矩；

M_{cyi} ——支柱 i 截面所受预应力的偏心弯矩；

$$N_{yi} = A_{yi} \sigma_{yi} \cos \alpha_i$$

$$M_{yi} = e_i A_{yi} \sigma_{yi} \cos \alpha_i$$

式中： A_{yi} ——截面 i 的预应力钢筋面积；

σ_{yi} ——钢筋的预应力大小；

e_i ——预应力的偏心距；

α_i ——预应力钢筋与截面 i 相交点切线的倾角。

在实际桥梁结构设计中，可以通过调整预应力钢筋的位置，或者通过调整支点反力来消减预应力所产生的次内力。

四. 混凝土收缩所产生的次内力计算

混凝土收缩相对变形的变化规律为：

$$\varepsilon_{st} = \varepsilon_{sk} (1 - e^{-\rho t}) \quad (1)$$

式中： ε_{sk} ——混凝土收缩变形的终极值（一般按温度降低 15~20 度来考虑）；

p ——表示混凝土收缩随时间增长的系数；

t ——从混凝土硬化时到计算收缩变形时的时间，习惯上称为龄期。

对于拼装式的桥梁，设合拢该桥梁时混凝土的龄期为 τ ，则此时已发生的收缩变形为

$$\varepsilon_{st} = \varepsilon_{sk}(1 - e^{-pt}) \quad (2)$$

因此在合拢后混凝土龄期为 t 时所产生的收缩变形为：

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{st} - \varepsilon_{s\tau} = \varepsilon_{sk}e^{-p\tau}[1 - e^{-p(t-\tau)}] \quad (3)$$

对于超静定刚架桥，混凝土的收缩将在其中产生次内力，对于铰支门形刚架桥，由于混凝土收缩引起的水平次反力为：

$$R \cdot \delta_{ss} + \Delta_{Rs} = 0 \quad (4)$$

式中： Δ_{Rs} 是由于混凝土收缩在基本体系活动支承端产生的水平反力方向的位移。

$$\Delta_{Rs}^b = \int_0^l \varepsilon_s^b ds \quad (5)$$

式中： l ——主梁长度；

b ——表示主梁。

对于斜腿刚架桥，应计入斜腿支柱收缩所引起的位移。每一斜支柱收缩所产生的水平位移为：

$$\Delta_{RS}^c = \int_0^s \varepsilon_s^c \cos \theta ds \quad (6)$$

总位移为：

$$\Delta_{RS} = \Delta_{RS}^b + 2\Delta_{RS}^c = \int_0^l \varepsilon_s^b dx + 2 \int_0^s \varepsilon_s^c \cos \theta ds \quad (7)$$

式中： s ——斜支柱长度；

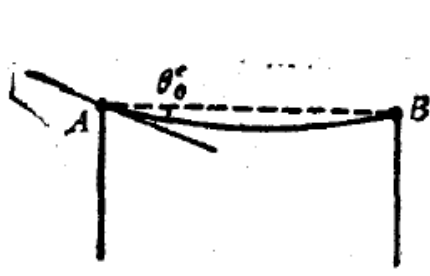
θ ——斜支柱倾角；

c ——表示支柱。

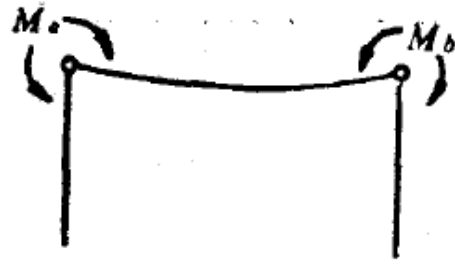
将式（5）和（6）代入式（1）即可求得次反力。

五. 混凝土徐变所产生的次内力计算

在超静定结构中，只有当体系发生转换时，混凝土徐变才引起内力的变化。门形刚架，主梁为整体预制，架设到支柱上，然后把梁柱接头整体化，体系发生转换，由自重应力产生的徐变将引起刚架内力的重分布。



(a)



(b)

选用图 (b) 为基本体系； M_a 为任意时刻 t 时，由于徐变所引起的端部弯矩； τ 为梁柱整体化时，混凝土的龄期。在任意时刻，在 dt 时间内，由于徐变产生的徐变转角增量为：

$$(M_0^e + M_a \bar{\theta}_{ab}^e) d\varphi_t \quad (1)$$

由于端弯矩增量 dM 所产生的转角为 $dM \bar{\theta}_{ab}^e$ ，主梁端截面总的转角为：

$$(\theta_0^e + M_a \bar{\theta}_{ab}^e) d\varphi_t + \bar{\theta}_{ab}^e dM_a \quad (2)$$

同样，支柱顶截面的转角为（柱端 M_e 与梁端 M_a 相等，方向相反）：

$$-(M_a \bar{\theta}_{ac}^e d\varphi_t + \bar{\theta}_{ac}^e dM_a) \quad (3)$$

根据变形协调条件，主梁和支柱的夹角不变，上列两个端截面转角应相等。

$$(\theta_0^e + M_a \bar{\theta}_{ab}^e) d\varphi_t + \bar{\theta}_{ab}^e dM_a = -(M_a \bar{\theta}_{ac}^e d\varphi_t + \bar{\theta}_{ac}^e dM_a) \quad (4)$$

即得：

$$\frac{dM_a}{d\varphi_t} + M_a + \frac{\theta_0^e}{\bar{\theta}_{ab}^e + \bar{\theta}_{ac}^e} = 0 \quad (5)$$

通解为：

$$M_a = Ce^{-\varphi_t} - \frac{\theta_0^e}{\bar{\theta}_{ab}^e + \bar{\theta}_{ac}^e} \quad (6)$$

利用初始条件： $\varphi_t = \varphi_\tau$ 时， $M_a = 0$ ，得：

$$U = \frac{\theta_0^e}{\bar{\theta}_{ab}^e + \bar{\theta}_{ac}^e} e^{\eta \tau} \quad (7)$$

代入整理得：

$$M_a = - \frac{\theta_{ab}^0}{\theta_a^0 + \theta_c^0} [1 - e^{-(\varphi_t - \varphi_{t'})}] \quad (8)$$

式中： θ_a^0 ——刚架主梁安装就位后的梁端弹性转角；

θ_{ab}^0 ——主梁两端作用单位力矩时所产生的梁端转角；

θ_c^0 ——柱顶作用单位力矩所产生的柱顶端转角。

倘若主梁和支柱系预应力混凝土构件，在梁柱整体化之前，已经张拉一部分钢筋，则上式可写成：

$$M_a = M_a^0 [1 - e^{-(\varphi_t - \varphi_{t'})}] \quad (9)$$

当计算徐变终极时的次内力时，式中 φ_t 改为 φ_k ，即徐变特征的终极值。此时

M_a 趋于 M_a^0 。

除此之外，还有由于在主梁至整体化之前的缩短，在整体化之后产生的徐变影响所引起的次内力。以上述的门式刚架为例，架设主梁的缩短仅仅是有作用在简支梁上的预应力引起的。

以上述的刚架为例，设此缩短为 Δ ，取简支的刚架体系为基本体系，支撑水平反力为未知力。假设 R 为任意时刻 t 由于徐变所引起的水平力， τ 为梁柱整体化时混凝土的龄期，则有：

$$R = R^0 [1 - e^{-(\varphi_t - \varphi_{t'})}] \quad (10)$$

式中： R^0 ——刚架整体化（合龙）之前的预加力作用到合龙后的结构中，在刚架支承处所引起的反力

由此产生的主梁梁端弯矩为：

$$M_a' = RH = HR^0 [1 - e^{-(\varphi_t - \varphi_{t'})}] \quad (11)$$

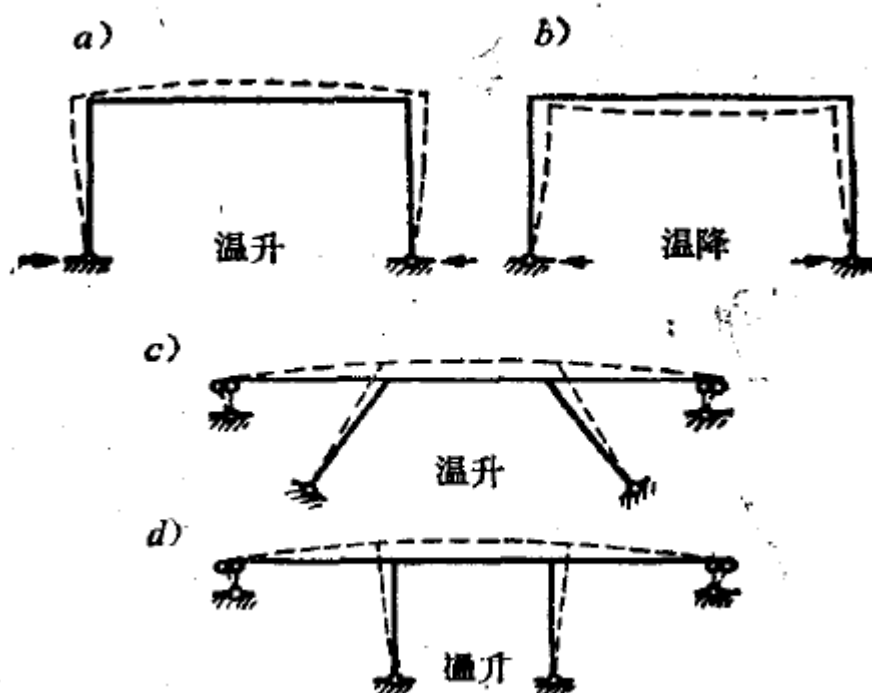
因此，由于徐变所产生的主梁梁端弯矩为：

$$\begin{aligned} M_a &= M^0 [1 - e^{-(\varphi_t - \varphi_{t'})}] + HR^0 [1 - e^{-(\varphi_t - \varphi_{t'})}] \\ &= (M^0 + HR^0) [1 - e^{-(\varphi_t - \varphi_{t'})}] \end{aligned} \quad (12)$$

六. 温度变化所产生的次内力的计算

1. 温度变化：

1) 均匀的温度变化：全结构的温度变化相同，产生次内力；对于均匀温度变化，计算参考温度为合拢温度。当合拢温度较高时，降温引起的次内力较大，其影响还与混凝土收缩的影响相同，两者叠加，将产生较大的次内力。因此，一般不宜在高温或温度变化较大的时候进行合拢，这是超静定结构施工的一般原则，请切记！



对于超静定刚架桥，温度变化产生次内力的计算方法与收缩产生的内力的计算方法相同，故对于铰支门形刚架桥，温度变化的变形：

$$\Delta_{Rt} = (t - t_0) \alpha \int \bar{N}_R dx = (t - t_0) \alpha L$$

式中： α ——混凝土和钢筋混凝土的线膨胀系数，可取用 $\alpha = 10^{-5}$ ；

L ——主梁的长度；

t_0 ——合拢时的计算温度；

t ——最高计算温度或最低计算温度。

按升温 and 降温分别计算后，根据最不利情况分别予以组合。

2) 不均匀温度变化：结构内产生了温度差，引起结构的变形而产生的次内力。

对于上述门形刚架，主梁顶面与底面的温差在结构基本体系的支点所产生的水平位移为：

$$\Delta'_{Rt} = \Delta t \alpha \int \frac{M_R}{h_{bi}} dx = \Delta t H \alpha L \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{bi}}$$

式中： H ——支柱高度

h_{bi} ——主梁各分段的中点高度

七. 其他荷载作用所产生的内力计算

此外，在有些情况下还考虑侧向土压力，基础的不均匀沉降产生的内力。对于多柱式支柱，需考虑横向刚架作用产生的内力。