

# 钢筋混凝土拱桥施工控制中的常见问题

苏小波

(招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆市 400067)

**摘要:**该文以拱圈上、下缘应力平衡为原则,分析了钢筋混凝土拱桥悬浇过程中临时索力控制方法;若拱圈刚度大、节段湿重小,可一次性悬浇整个节段,并完成临时扣索张拉;反之则需分层多次浇筑、临时索力多次张拉。通过对两座实际拱桥分析,详细阐述了该方法的可行性及控制效果;其次,针对主拱圈在悬浇过程中的索力累计效应带来的不利影响,探讨了临时扣索的放张方法及效果;最后,就实际施工方案与设计阶段施工方案往往不完全一致、导致成桥状态存在差异的实际问题,提出了两种可行的解决方法。

**关键词:**钢筋混凝土拱桥;挂篮悬浇;张拉方案;合龙措施

山区峡谷地形条件下的桥型方案选择,往往受运输条件有限、作业场地狭小、施工组织困难等因素制约。采用钢筋混凝土拱桥方案+斜拉扣挂的施工方法,能有效避免大节段运输、施工场地受限等困难,极大地提高施工效率,因而得到了广泛应用。钢筋混凝土拱桥的临时拉索在悬浇过程中主要起调节施工过程拱圈内力的作用,对成桥阶段的内力和线形也会有显著影响。该文结合两个实际工程,就钢筋混凝土拱桥施工控制中几个问题进行探讨,以供类似工程参考。

## 1 施工控制的主要内容和测点布置

根据大跨径拱桥上部构造施工的流程、特点及其施工阶段结构受力特征和仿真计算结果,选择受力比较典型的截面作为控制截面,埋设内力传感器、在拱圈表面布设位移观测点,对结构内力和线形进行实时跟踪控制,以保证结构在每一施工阶段,其内力与线形都处于预测控制之中,并在成桥阶段满足内力和线形均

- \*\*\*\*\*
- 变的情况下,箱室温度升高、体外索张力下降,箱室温度下降,体外索张力升高,年内变化幅度约为1.9%。
- (2) 预应力筋松弛损失对体外索张力损失影响明显,7 d 预应力损失约为1.0%,1年内可达1.9%,此后基本趋于稳定。
- (3) 对于中等跨径的箱梁桥,车辆荷载冲击疲劳作用对体外索应力损失影响不显著。
- (4) 体外索张力损失沿索长分布较均匀,索长中心截面应力损失略大于锚固端损失,平均差值约为张拉控制应力的0.89%。
- (5) 体外索应力损失基本在1年内完成,此后发展缓慢,2年的应力损失约为张拉控制应力的2.0%。
- 参考文献:**
- [1] 马晔,尼颖升,徐栋,等.基于空间网格模型分析的体外预应力加固[J].吉林大学学报(工学版),2018(1).
- [2] 蒋伟,崔海.体外预应力加固桥梁的荷载试验评定研究[J].中外公路,2017(2).
- [3] 张海东,田章华,段元峰.基于磁弹效应的拱桥吊杆索力监测[J].结构工程师,2016(4).
- [4] Yuan-Feng Duan, Ru-Zhang, Chuan-Zhi Dong. Development of Elasto-Magneto-Electric (EME) Sensor for In-Service Cable Force Monitoring[J]. World Scientific, 2016(4).
- [5] 余超良.体外预应力加固连续梁桥施工监控研究[J].中外公路,2013(6).
- [6] 宋娃丽,宋文彬.PC箱梁体外预应力加固的非线性分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017(6).
- [7] 殷新锋,王成煜,黄屿,等.体外预应力桥梁转向块的受力性能分析[J].中外公路,2017(5).

达到设计要求的目。对于混凝土拱桥而言,施工控制在形式上为以主拱圈线形控制为主,应力控制为辅,同时兼顾主拱圈扣索索力的控制。图 1 为主拱圈截面的主要测点布置情况。

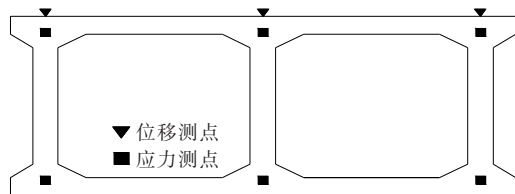


图 1 钢筋混凝土拱桥主拱圈主要测点布置

## 2 常见问题分析

### 2.1 基本力学模型

在主拱圈悬臂浇筑过程中,已经浇筑成型的拱圈受力模式可简化为多点弹性支撑的曲梁。其悬臂端主要承担挂篮自重和混凝土湿重荷载。以施工中拱圈的受力合理为目标进行调索,理想的力学模型可以做到临时索力随悬浇过程的推进而实时调整,使拱圈截面始终处于轴压状态。但实际实施过程中,施工工序总有先后之别。即重复着“悬浇—调索—悬浇”这一过程,因此在调索过程中,不仅要平衡该阶段悬浇产生的负弯矩,还要兼顾下阶段悬浇产生的负弯矩,同时还要要求索力不会过大导致拱圈正弯矩超标;必须将临时索力调整限制在一个范围之内,达到相对平衡的状态。其上、下限分别为悬浇过程拱圈上缘和张拉过程拱圈下缘的结构响应(如应力、裂缝宽度等)限值。

### 2.2 临时扣索的张拉方案选择

在实际工程中,临时拉索可选择一次性张拉,也可选择分阶段张拉,视具体情况而定。若主拱圈刚度大、悬浇节段长度相对较小,每悬浇一个节段湿重对已成型拱圈的影响较小,则可在悬浇结束后一次性张拉到位,反之则需分阶段多次张拉。多次张拉方案的复杂程度与挂篮的形式有关,对于前支点挂篮(图 2),临时索力的控制比较简单,在每一个节段浇筑一层混凝土之后,张拉一部分前支点索力,分阶段平衡挂篮和湿重荷载对拱圈的影响直至该节段浇筑完成,待混凝土达到设计强度后,挂篮前移,循环进行下节段施工。

对于后支点挂篮,则情况稍复杂,由于该节段临时拉索在混凝土强度达到设计强度之前尚不具备张拉条件,因而效率最高的方式是对上一节段临时扣索进行补张,以平衡部分该节段挂篮和混凝土湿重产生的附

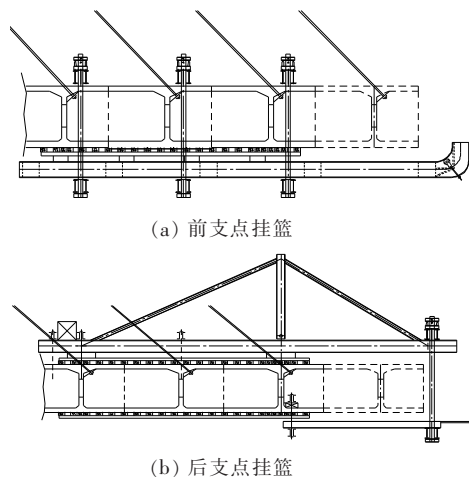


图 2 前、后支点挂篮示意

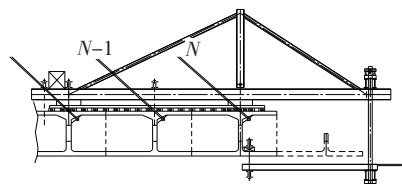
加弯矩。一般悬浇过程以拱圈应力为控制目标,具体操作如下:

取当前状况拱圈截面上缘的应力计为  $\sigma_{At}$ 、下缘计为  $\sigma_{Ab}$ ,假定挂篮悬浇下节段浇筑混凝土湿重合计产生的上缘拉应力为  $\Delta\sigma_{1t}$ 、下缘压应力为  $\Delta\sigma_{1b}$ ,张拉前节段临时拉索产生的上缘压应力为  $\Delta\sigma_{2t}$ 、下缘拉应力为  $\Delta\sigma_{2b}$ ;待该节段混凝土达到设计强度后,张拉该节段临时拉索产生的上下缘应力分别计为  $\Delta\sigma_{3t}$  和  $\Delta\sigma_{3b}$ 、并同步放张上节段临时拉索至初始设计索力。一般悬浇节段拱圈压应力较小、主要是拉应力控制。限制全过程截面上、下缘的拉应力峰值为  $[\sigma]$ ,则可列不等式方程组如下:

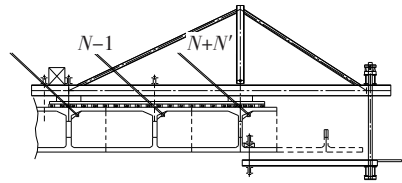
$$\begin{cases} \sigma_t = \sigma_{At} + \frac{1}{n} \Delta\sigma_{1t} + \frac{1}{(n-1)} \Delta\sigma_{2t} \leq [\sigma] \\ \sigma_b = \sigma_{Ab} + \frac{1}{n} \Delta\sigma_{1b} + \frac{1}{(n-1)} \Delta\sigma_{2b} \leq [\sigma] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n$  为该节段混凝土浇筑需要划分的层数,近似按每层方量相等考虑;若  $n=2$ ,则上节段临时拉索补张一次即可;若  $n>2$ ,则令  $\Delta\sigma_{At} = \sigma_t$ 、 $\Delta\sigma_{Ab} = \sigma_{tb}$ ,重复计算  $n-1$  次;一般而言, $n$  取 2~3 即可。在悬浇结束后,同样依据上下缘拉应力限值计算该节段临时拉索力,张拉该节段临时拉索。

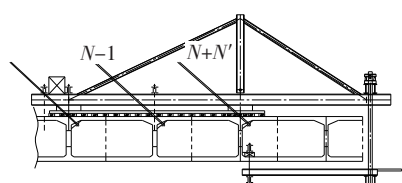
尤其需要注意的是:由于补张上节段临时拉索已经平衡了大部分悬浇节段荷载,再张拉该节段临时拉索可能导致拱圈下缘拉应力超标。因此,需要在张拉该节段临时拉索的同时,同步卸载已经补张的上节段扣索至初始设计索力,完成临时索力的位置“转换”。至此,一个节段完整的施工过程结束。节段混凝土分两次浇筑的情况如图 3 所示。



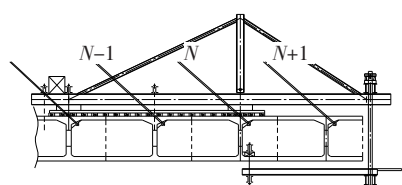
(a) 步骤 1:挂篮前移,浇筑 1/2 该节段拱圈



(b) 步骤 2:补张上节段临时拉索至  $N+N'$



(c) 步骤 3:浇筑该节段剩余混凝土,养护至设计强度



(d) 步骤 4:张拉临时拉索  $N+1$ ,同步放张上节段索力至  $N$

图 3 后支点挂篮分层悬浇一个节段流程

实际上,由于拱桥线形的特殊性,前支点挂篮会导致挂篮构造和施工的复杂程度大大增加,一般都选择后支点挂篮施工。下面结合两个实际工程,介绍不同的临时索力控制方法及效果。

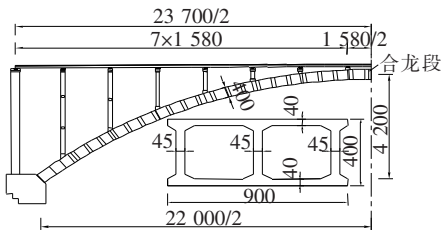
桥 A:主跨为 220 m 钢筋混凝土拱桥,矢高为 42 m。截面尺寸为 4 m(高)×9 m(宽),最大悬浇节段长度为 5.2 m,最大湿重为 204.1 t,主拱圈划分为 21 个悬浇节段。

桥 B:主跨为 180 m 钢筋混凝土拱桥,矢高为 30 m。截面尺寸为 3.5 m(高)×7.5 m(宽),最大悬浇节段长度为 6.38 m,最大湿重为 198.6 t,主拱圈划分为 17 个悬浇节段。桥 A、B 桥型布置如图 4 所示。

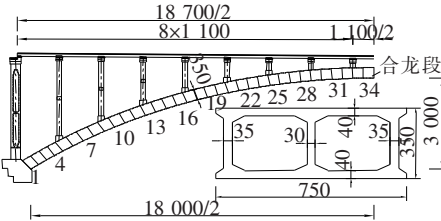
两座桥均采用后支点挂篮施工,挂篮自重均取最大节段重量的 0.4 倍,即桥 A 挂篮自重 82 t,桥 B 挂篮自重 80 t。按照上述原则,对施工阶段临时扣索索力进行调整。

当  $n=1$  时,即悬浇节段不分层浇筑,一次浇筑完成且混凝土强度达到设计强度后张拉该节段临时拉

索。表 1 为两座桥的施工阶段临时索力,图 5 为按照表 1 所示的临时索力计算的主拱圈施工阶段上、下缘应力包络曲线。



(a) 1/2 桥 A



(b) 1/2 桥 B

图 4 两座拱桥桥型布置图(单位:cm)

表 1 节段一次浇筑法两座桥施工阶段临时索力

拉索 编号	临时索力/kN		拉索 编号	临时索力/kN	
	桥 A	桥 B		桥 A	桥 B
1 <sup>#</sup>	1 850	800	12 <sup>#</sup>	1 290	1 300
2 <sup>#</sup>	910	1 000	13 <sup>#</sup>	1 430	1 400
3 <sup>#</sup>	910	1 000	14 <sup>#</sup>	1 540	1 450
4 <sup>#</sup>	910	1 000	15 <sup>#</sup>	1 540	1 500
5 <sup>#</sup>	800	1 000	16 <sup>#</sup>	1 470	1 600
6 <sup>#</sup>	900	1 150	17 <sup>#</sup>	1 840	1 400
7 <sup>#</sup>	1 000	1 100	18 <sup>#</sup>	1 840	—
8 <sup>#</sup>	900	1 200	19 <sup>#</sup>	2 200	—
9 <sup>#</sup>	1 130	1 200	20 <sup>#</sup>	2 390	—
10 <sup>#</sup>	1 130	1 250	21 <sup>#</sup>	2 200	—
11 <sup>#</sup>	1 300	1 260	—	—	—

注:拉索按照从拱脚到跨中方向依次增大进行编号。

由图 5 可见:桥 A 的最大应力为 1.3 MPa(拉为正、压为负,下同),小于规范限值 1.855 MPa,发生在拱脚截面下缘;桥 B 最大应力为 3.2 MPa,也发生在拱脚截面下缘,但超过应力限值。原因在于桥 B 跨径相对 A 桥小,截面刚度相对较弱,而悬浇荷载(包括混凝土湿重和挂篮)又和桥 A 基本相当,已浇筑成型的拱圈截面承担不了一个节段的悬浇荷载,需要对其施工过程进行优化。

现假定  $n=2$ ,即桥 B 的每个节段混凝土分两次等

量悬浇完成,且在下层混凝土悬浇之后,对上一个节段的临时拉索进行补张,通过减轻悬浇重量、增加索力调整次数的方式优化主拱圈的截面内力。表 2 为优化后桥 B 在施工阶段的临时索力;图 6 为优化后桥 B 拱圈上、下缘在施工阶段的拉应力包络图。

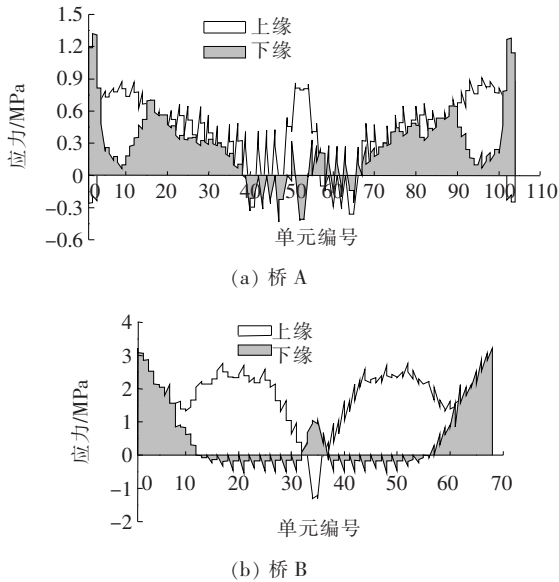


图 5 一次浇筑法施工的主拱圈上下缘应力包络图

表 2 节段分层浇筑法桥 B 施工阶段临时索力

拉索 编号	初张索 力/kN	补张索 力/kN	拉索 编号	初张索 力/kN	补张索 力/kN
1#	600	1 200	10#	1 200	1 600
2#	1 000	1 800	11#	1 200	1 700
3#	1 000	1 500	12#	900	1 500
4#	800	1 300	13#	1 200	2 000
5#	800	1 400	14#	1 100	2 100
6#	800	1 200	15#	1 500	2 300
7#	800	1 500	16#	1 600	2 000
8#	1 000	1 500	17#	800	—
9#	900	1 600			

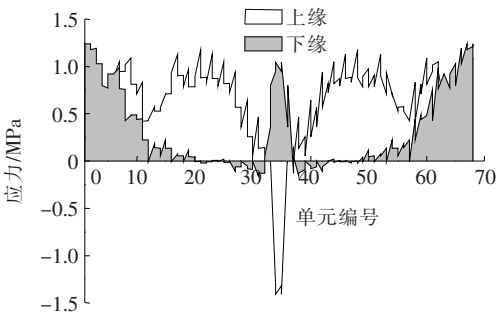


图 6 桥 B 分层浇筑法施工时主拱圈上下缘应力包络图

由图 6 可见:上、下缘最大应力均为 1.2 MPa,小于规范限值,满足设计要求。

临时索力的调整也是拱圈线形控制的内容之一,但还是应结合当前实测高程,根据设计目标线形及计算模型预测后期线形走势,采用对悬浇节段进行预抛高的方法在过程中对线形进行动态调整,直至逼近设计状态。

2.3 施工过程中索力放张选择

对上述索力调整的分析中,实际还包含另外一个重要的施工过程:施工过程中的部分索力完全放张(即拆除)。随着悬浇长度的增加,由于索力的数量增加,主拱圈截面的内力和应力会逐步累积;在悬浇一定节段后,在主拱圈跨中某些区域,上缘压应力储备小;在拱脚截面,下缘压应力储备小。若先悬浇节段混凝土,由于负弯矩效应,跨中区域截面上缘拉应力超标;若先张拉上阶段临时拉索,由于正弯矩效应,拱脚截面下缘拉应力超标。而且这种矛盾的情况在整个拱圈施工过程中甚至出现多次。此时,可对已张拉的临时拉索进行分阶段放张,改善拱圈的受力状况,再进行下一节段的施工。考虑到拱圈节段的无支撑长度(即临时拉索的支点间距)不宜过长,一般选择拉索间断放张,放张的时机需详细计算确定。

图 7 为施工过程中临时拉索的放张与否对拱圈应力的影响。

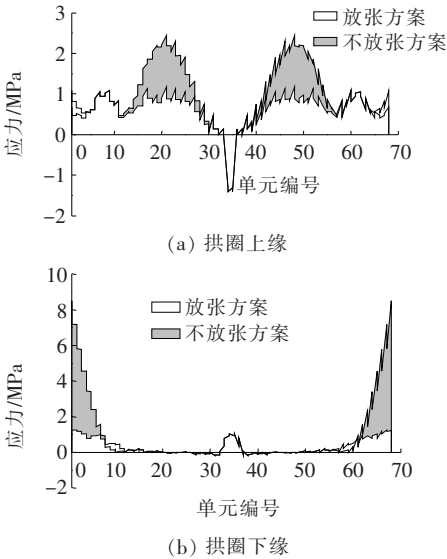


图 7 放张与否对桥 B 拱圈应力包络的影响

由图 7 可知:若不对部分拉索采取放张措施,拱圈上缘最大拉应力将由 1.2 MPa 增加至 2.4 MPa;下缘最大拉应力将由 1.2 MPa 增加至 8.5 MPa,远大于规



范限值,而采用放张方案则在整个悬浇过程主拱圈截面应力均满足规范限值。图 8 为桥 B 经过计算后确

定的主拱圈施工顺序。由图 8 可以看到:1<sup>#</sup>~11<sup>#</sup> 奇数拉索在悬浇过程中均进行了拆除。

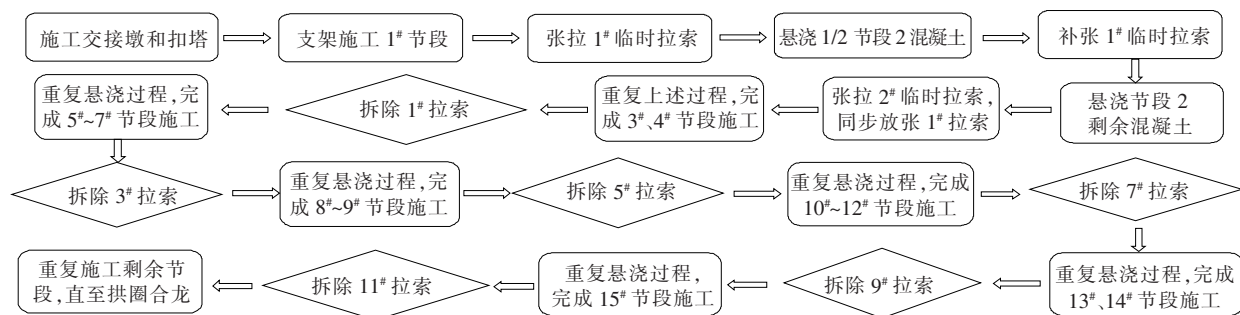


图 8 桥 B 主拱圈主要施工顺序

## 2.4 主拱圈合龙方案的研究

根据无应力状态理论可知:桥梁结构的成桥状态只和结构单元的无应力尺寸有关,一旦无应力尺寸确定,则成桥状态唯一不变,而这个无应力尺寸是指结构在边界条件确定的情况下,根据有应力状态计算而来。其中边界条件包含结构尺寸和体系、恒载、温度等影响成桥状态的一切因素。对于支架现浇的拱桥,可以认为实际成桥状态和计算的一致;但对于采用挂篮悬浇成型的拱桥,由于在每个节段均会设置预拱度调整挂篮的标高和转角,而这一调整的实质就是改变了拱圈每个节段的无应力尺寸。因此,严格来说,采用斜拉扣挂悬浇合龙的桥梁,其成桥状态和施工过程相关。但一个现实的问题是在设计阶段并不能完全真实模拟施工全过程并保证精确,临时扣点的位置、扣塔的高度、挂篮的重量等不确定因素均会影响施工过程中的临时索力,进而导致成桥状态和设计理论状态不完全一致。为解决这个问题,从工程角度出发,采取以下方案:采取特定的辅助措施合龙。对于采用节段预制拼装法施工的桥梁来说,工厂化预制和切线拼装保证了每个节段的无应力尺寸不变,因此理想的合龙口状态为合龙段杆件的无应力尺寸也保持不变,即合龙口两侧的相对位移和截面相对转角均为零。而实际悬臂拼装过程中,由于结构自重、临时索力、临时荷载等因素的影响,在最大悬臂状态合龙口两侧截面不可避免会产生位移和转角(如图 9 中虚线所示)。此时,以合龙口两端截

面的相对位移和转角为零作为目标状态,可以计算出所需要的辅助合龙作用力  $N1 \sim N3$ 。

对于采用挂篮悬浇的混凝土拱桥而言,由于线形调整的需要而考虑了施工预拱度,导致合龙口的状态 and 图 9 相比发生了变化。但由于预拱度只是调整线形而并不改变结构的内力状态,即在整个悬浇过程中,主拱圈的内力状态和采用工厂预制、切线拼装法施工的桥梁完全一致,最终导致两种施工方法产生内力差异的原因就在于合龙措施的差异。若合龙措施也采用工厂预制、切线悬拼法计算  $N1 \sim N3$ ,则松扣后的主拱圈内力状态必然也和预制悬拼法施工的桥梁保持一致,即和一次成桥的内力状态保持一致。图 10、11 分别为桥 B 采用挂篮悬浇法施工考虑了合龙措施的模型和一次成桥模型在二恒阶段的主拱圈弯矩  $M_y$  和轴力  $N_x$ ,最大误差均为 2% 左右,剔除了收缩徐变的影响之后,可以认为两种方法得到的目标状态完全一致。

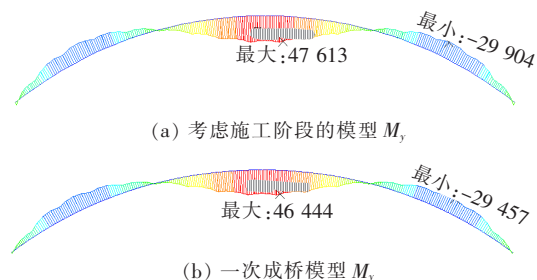


图 10 考虑施工阶段和一次成桥的主拱圈成桥状态弯矩  $M_y$  (桥 B) (单位:  $\text{kN} \cdot \text{m}$ )

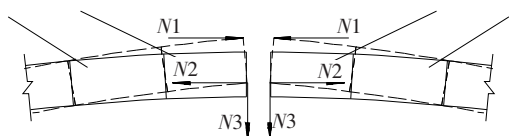


图 9 合龙口调整措施示意

此外,还有一点需要补充说明:以上分析均基于一次落架为合理成桥状态这一前提。基于这一前提有一个隐含的原因:如前文所述,由于阶段性和侧重点不同,在设计过程中,设计人员并不能完全真实和精确地模拟施工全过程,但设计必须有一个目标状态才能开

展工作。对于拱桥而言,一次落架状态未必就是最优的成桥状态,还和拱上荷载的布置及大小、矢跨比、拱轴系数等因素相关。若合理设计临时扣索的张拉方案,即使不采用合龙措施  $N1 \sim N3$ ,也能使拱圈的安全储备在合理状态。图 12 为桥 B 采用挂篮悬浇法而未采取合龙措施施工的模型在二恒阶段的内力,与图 10、11 相比,最大正弯矩降低了 41%、最大负弯矩基本一致、最大轴力也仅增加 1.5%;虽然拱脚截面正弯矩有所增加。但考虑活载组合之后,拱脚截面正弯矩不控制设计,从设计角度而言,既能够保证结构合理的安全储备,又能方便施工、减少工序,此时的成桥状态也不失为一种“合理成桥状态”。

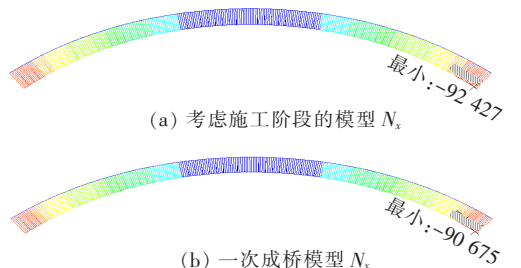


图 11 考虑施工阶段和一次成桥的主拱圈成桥状态轴力  $N_x$  (桥 B) (单位: kN)

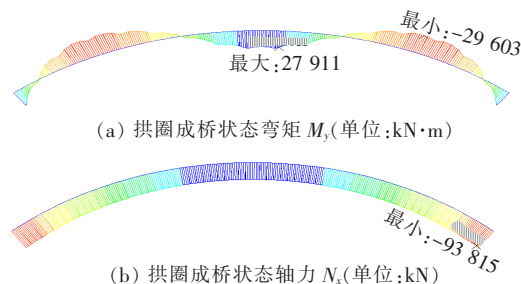


图 12 不采取合龙措施的拱圈成桥状态内力 (桥 B)

### 3 结论

(1) 钢筋混凝土拱圈的悬臂施工过程可简化为端部固结、多点弹性支撑的曲梁单元,临时索力的控制可根据拱圈截面的结构响应(如拉应力、裂缝宽度等)限值作为约束条件。

(2) 临时扣索的张拉方案与主拱圈的刚度、悬浇节段湿重有关。拱圈刚度大、节段湿重小,可一次性悬浇整个节段,待混凝土强度达到设计要求后张拉该节段临时扣索;反之则需分层多次浇筑、临时索力多次

张拉。

(3) 对采用后支点挂篮、混凝土分层多次浇筑的钢筋混凝土拱桥,由于该节段临时拉索在节段混凝土完全施工之前不具备张拉条件,可采用对上节段临时拉索进行补张的方式调整施工过程中拱圈内力;待该节段混凝土强度达到设计要求后,再张拉该节段临时扣索至设计索力、并同步放张上节段临时扣索至初始索力,完成索力转换。

(4) 钢筋混凝土拱圈在悬臂施工过程中,拱圈上缘和下缘的拉应力常出现同时超限的现象,一般需要对部分临时扣索进行放张。考虑到主拱圈的无支撑长度不宜过长,可选择奇数或偶数根拉索进行放张,放张的时机根据计算情况确定。

(5) 即使采用挂篮悬浇法施工的拱桥,理想的合龙措施也可根据节段预制拼装法施工的理论模型计算得到。但实际合龙措施的设计仍需综合考虑受力合理、施工便捷等综合因素。

### 参考文献:

- [1] 李晓斌,杨永清,蒲黔辉,等. 钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑施工模型试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2007(5).
- [2] 郝聂冰,顾安邦. 钢管混凝土拱桥拱肋吊装过程线形调整方法研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016(3).
- [3] 陈强,张凯杰,周水兴,等. 单箱单室混凝土拱桥拱圈悬臂浇筑施工控制[J]. 公路, 2019(1).
- [4] 李光华,于新波,商淑杰,等. 大跨径钢筋混凝土拱桥扣锚索索力优化调整研究[J]. 公路交通科技, 2018(7).
- [5] 周倩,周水兴,李晓庆,等. 混凝土拱桥悬臂浇筑施工力学性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018(3).
- [6] 张德志. 悬臂浇筑钢筋混凝土拱桥施工控制技术研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2012.
- [7] 裴宾嘉,曹瑞,彭劲根,等. 拱桥悬臂浇注挂篮的设计和创新[J]. 公路, 2008(1).
- [8] 胡大琳,陈定市,赵小由,等. 大跨径钢筋混凝土拱桥悬臂浇筑施工控制[J]. 交通运输工程学报, 2016(1).
- [9] 秦顺全. 桥梁施工控制——无应力状态法理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- [10] 徐林,刘琪. 基于无应力状态控制法的斜拉桥安装计算方法研究[J]. 中外公路, 2019(1).
- [11] 李建华. 钢筋混凝土箱形拱桥施工控制[J]. 世界桥梁, 2013(4).