

# 三跨连续加劲梁悬索桥无索区梁段 线形调整方法研究

戚兆臣<sup>1</sup>,唐茂林<sup>2</sup>,崔冰<sup>3</sup>,董盟<sup>3</sup>,王明<sup>2</sup>

(1. 南京重大路桥建设指挥部, 南京 210033; 2. 西南交通大学土木工程学院, 成都 600031;

3. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

**[摘要]** 三跨连续加劲梁悬索桥在桥塔处梁段刚接及体系转换时如何保证无索区的线形平顺过渡、顺利进行体系转换、确保成桥线形与内力一致是一个难度较高的技术课题。本文讨论了国内外无索区梁段进行体系转换的方法,并以一座超千米的三跨连续钢箱梁悬索桥为例,实现其无索区加劲梁体系转换、线形调整和施工控制。

**[关键词]** 悬索桥;加劲梁;无索区;线形

**[中图分类号]** U448.25 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)08-0037-05

## 1 前言

悬索桥是一种最适于大跨度的桥型,在跨越大峡谷、跨江、跨海、连岛、连洲工程中,它往往成为唯一的桥型。悬索桥的主缆曲线具有柔性之美,尤其是三跨悬吊加劲梁悬索桥。三跨连续加劲梁悬索桥具有抗风与抗震性能好、线形流畅、外形美观等优点,是悬索桥结构体系的一大进步。采用这种体系,桥塔处取消了伸缩缝,线形避免了折角,运行车辆可高速、平稳地通过,大大提高了行车的舒适性;结构的横向变形小,可减小吊索的横向弯折应力,延长吊索的使用寿命等。瑞典的滨海高桥和丹麦的大贝尔桥以及我国的厦门海沧大桥、南京长江第四大桥均为采用了三跨连续体系钢箱梁的悬索桥。三跨连续加劲梁悬索桥由于在桥塔处连续,此处一般具有较长的无索区,梁段刚接及体系转换时如何保证无索区的线形平顺过渡、顺利进行体系转换、确保成桥线形与内力一致是一个难度较高的技术课题。本文将讨论三跨连续加劲梁悬索桥无索区梁段体系转换、线形调整和控制技术。

## 2 体系转换方法

根据国内外资料,对于连续加劲梁悬索桥,桥塔无索区加劲梁有4种体系转换方法曾经被采用,即临时提升装置、临时支架法、临时吊索+支架法、缆载吊机调节法。

1)临时提升装置。大贝尔特桥<sup>[1]</sup>是一座主跨为1 624 m的三跨连续钢箱梁悬索桥。索塔之间有2个无索梁段,采用缆载吊机及设在桥塔横梁上的临时提升装置(一组临时穿心式千斤顶)进行安装。先在工厂将2个梁段焊好,从边跨采用双吊机抬吊,吊装前将主跨位置的水平千斤顶连接到钢箱梁上,起吊至正常高程后,启动水平千斤顶将梁段水平拉入塔柱之间,与悬挂于横梁上的临时调节装置连接,然后逐步放松吊机,使荷载转移至临时提升装置上,待梁段吊装完成后,下放塔区无吊索梁段,调节线形,与相邻梁段连接,焊接完成后拆除临时提升装置,即完成了该位置梁段安装。

2)临时支架法。西墩门大桥<sup>[2]</sup>是一座主跨为1 650 m的两跨连续钢箱梁悬索桥。索塔之间有3段

**[收稿日期]** 2013-05-22

**[作者简介]** 戚兆臣(1973—),男,山东枣庄市人,高级工程师,研究方向为工程现场建设管理;E-mail:njqzc@163.com

无索梁段。无索区梁段安装采用支架,3个梁段首先被吊装到支架上,然后采用千斤顶调节3个梁段的线形并焊接起来。然后再采用千斤顶调节3个梁段,使之与边跨和中跨第一个有吊索梁段临时连接,完成焊接后拆除支架,即完成无索区梁段体系转换。

3)临时吊索+支架法。重庆鹅公岩大桥是主跨为600 m的三跨连续钢箱梁悬索桥。塔区梁段有3段无索梁段,其中塔区梁段吊装完成放在支架上,中、边跨侧梁段起吊后转换到临时吊索上,临时吊索为可张拉调节的结构。待3段梁吊装完成后,先调整张拉临时吊索,与位于支架上的中横梁位置梁段相连,调整线形,打码焊接,3个无索区吊索被刚接到一起,然后调整临时吊索,使无索区吊索与中、边跨第一根吊索梁段相连,调整线形,打码焊接。

4)缆载吊机调节法。厦门海沧大桥<sup>[1]</sup>是主跨为648 m的三跨连续钢箱梁悬索桥。塔区梁段有3段无索梁段,其中横梁位置梁段采用边跨侧单台吊机起吊,中跨侧吊机辅助牵引平移就位,最终放置于横梁支架上,中、边跨侧梁段采用单吊机安装并临时悬吊,待这3段无索梁段与相邻有吊索梁段调整好线形,打码焊接完成,先行卸除横梁位置支架,接着吊机卸载,完成体系转换。

### 3 调整及控制技术

上面4种方法均有在实桥上成功的例子。方法1无疑是最好的,临时结构主受力系统为上承式,相当于从上边横梁吊了一个托起梁段的满堂刚性托架,无索区梁段可以再现厂内制造线形,保证了梁段的无应力焊接,同时由于悬吊托架的受力系统也是拉索,从而保证了与有吊索梁段温度变形的一致性,因此也能确保与有吊索梁段连接的两道环缝的良好焊接,但该法临时系统的施工难度也无疑是最高。

方法2的临时结构主受力系统为下承式,相当于从下边基础支起一个托起梁段的满堂托架,无索区梁段同样可以再现厂内制造线形、保证梁段的无应力焊接,但无索区与有索区梁段存在着温度变形不一致的问题,在无索区梁段焊接完成后需要再次调整无索区梁段与有索区梁段连接线形,并且调整完成后必须立即打码焊接,此过程不能有急剧的温度变化,否则无法保证没有焊接缺陷或者波浪线形。

方法3综合运用了支架(下承式)和拉索(上承式),它能保证与有吊索梁段连接的两道环缝的良

好焊接,由于无索区有3段梁,其中一段梁放于支架上,所以仍然有两道环缝存在着方法2的问题,即无索区与有索区梁连接后,无索区梁段存在着温度变形不一致的问题,线形调整与控制方法与方法2类似。但是方法3由于采用临时吊索代替部分支架,可能比方法2省材料,当然方法2中的支架可以在多座桥上重复使用,但方法3的临时吊索可能重复使用率低,所以要综合考虑施工造价和材料造价。

方法4仍然是上承式,以缆载吊机钢丝绳代替临时拉索,省去了临时结构,调整也最方便,但线形之间的匹配性除受方法2、方法3中温度的影响外,还有吊机的巨大临时荷载对线形和内力的影响,最终焊接出来的环缝质量和梁段线形的风险较大,并且一般只有卷扬式的吊机可以较长时间锁定,液压式的吊机悬吊重物后较长时间锁定也存在着风险。

按方法1、方法2施工时,由于梁段是满堂支撑或者多点支撑,通过设置预拱度即可实现落架变形后达到目标状态,预拱度的设置根据与相邻梁段焊接落架后的变形得到。施工控制时应根据计算的预拱度确定出梁段在支架上的标高(即定出梁段在支架上的线形),并根据在支架上梁段的预拱线形确定出相邻梁段为满足焊接要求设置的转角量,转角通过梁端简易的工装可以实现调整。

方法3、方法4具有相似性。对于方法4,支架上的梁段可以通过支架标高调整梁段的标高,两侧临时吊索下的梁段通过吊索的张拉和梁端的压重分别实现梁段标高和转角的调整。按照类似于方法2的思路,确定出3段梁的预拱线形,根据预拱线形设置支架梁段底部支点标高、确定吊索张力和梁端转角。施工控制中应准确给出各梁段的控制参数,保证梁段的无应力长度和曲率不变,实现体系转换。

## 4 临时支架法应用实例

### 4.1 工程概况

某超千米的三跨悬吊悬索桥其主缆分跨为(166 m+410.2 m)+1 418 m+(363.4 m+118.4 m)=2 476 m,主缆垂跨比为1/9.003。主缆采用高强度镀锌平行钢丝索股(PPWS)组成,加劲梁采用流线型扁平钢箱梁。结构总体布置见图1。全桥共计4个无索区、2个边跨梁端无索区和2个桥塔无索区。其中桥塔无索区有3段加劲梁,梁段类型为E、F、G;梁端无索区有1段加劲梁,梁段类型为I。如何保证无

索区与有吊索区梁段的连接平顺,保证成桥线形和  
内力与设计一致,是本桥施工和控制的重点内容。

图2为无索区示意图。

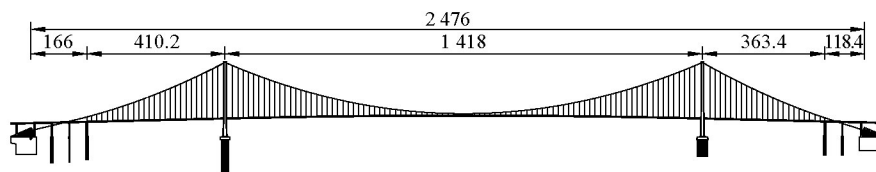


图1 总体布置图(单位:m)

Fig.1 The general structure arrangement (unit: m)

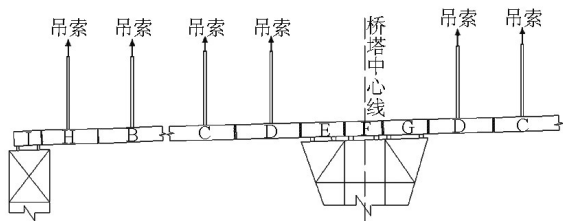


图2 北侧梁端及桥塔无索区示意

Fig.2 The diagram of the region without hangers  
at the north end of girders and north tower

#### 4.2 体系转换步骤

该桥采用临时支架法无索区梁段线形调整和体系转换。由于该桥无索区梁段较长,在加劲梁自重和二期恒载作用下,必然发生下挠。这就要求无索区梁段必须设置预拱度,当焊接并拆除支架后,无索区梁段下挠变形的线形就刚好为所需要的线形。该法操作工艺比较简单,但对监控计算与施工均提出了较高要求,监控计算尤其复杂,必须考虑几何非线性的影响。拟定的线形调整和体系转换步骤如下。

- 1)调整E、F、G梁段到指定线形。
- 2)打码焊接梁段环缝E-F、F-G形成3段连接单元E+F+G。
- 3)打码焊接梁段环缝D-E、G-D,形成5段连接单元D+E+F+G+D。
- 4)逐步解除桥塔无索区临时支撑。
- 5)施加强制力临时连接C、D梁段。
- 6)C、D梁段完成临时连接,桥塔无索区体系转换完成。

#### 4.3 计算阶段

由于涉及目标成桥线形,且无索区梁段自重作用到吊索后,有索区也将发生变形,因此不是单独取出无索区梁段进行计算就可以决定无索区梁段

线形,而是必须采用全桥计算模型进行计算才能加以确定。本文采用西南交通大学桥梁工程系编制的软件BNLAS<sup>[4]</sup>进行施工全过程的仿真计算。为考虑主缆垂度的影响,主缆及主缆在锚固处的索股采用空间悬链线单元进行模拟;吊索采用空间膜单元进行模拟;桥塔、加劲梁采用具有6个自由度的空间梁单元进行离散,其中计入了剪切变形对结构内力及位移的影响。

首先,根据一期恒载和二期恒载,通过反复迭代计算,确定出该桥的合理成桥状态模型。然后,采用施工倒拆的计算方法倒拆至无索区体系转换前的状态,再以此状态为基础来分析无索区梁段的体系转换过程。有限元模型共计80个施工计算阶段,确定出合理成桥状态之后,从合龙状态(40阶段)倒拆至体系转换前的状态(44阶段),然后开始体系转换的计算分析。关于体系转换的施工阶段划分见表1。

#### 4.4 计算方法

桥塔无索区体系转换过程包括两个计算内容:无索区加劲梁预拱度的设置和C-D梁段合龙时强制力的计算,计算方法如下。

##### 4.4.1 无索区加劲梁预拱度的设置

根据施工阶段可知:43阶段是采用倒拆分析断开了C-D间的临时连接,而47阶段是C-D合龙前的状态,因此43阶段与47阶段是受力状态相同的两个阶段。据此可以把43阶段作为47阶段的目标状态,通过在45阶段顶升加劲梁形成预拱度来实现两个状态的等效。具体计算方法如下。

1)计算43阶段桥塔无索区各支承点的竖向位移 $Y_0$ 。

2)计算47阶段桥塔无索区各支承点的竖向位移 $Y_1$ ,则在45阶段设置的支座沉降位移(加劲梁顶升值)初始值为 $S_1=Y_1-Y_0$ ,并代入模型求解。



表1 体系转换过程

Table 1 The system transformation process

施工阶段	施工内容	施工阶段	施工内容
40阶段	加劲梁合龙阶段	51阶段	桥塔无索区体系转换完成
41阶段	断开I-H临时连接	53阶段	顶升梁段无索区梁段I,使与I-H合龙
42阶段	拆除限位装置吊索	54阶段	I-H临时连接,断开H-B连接
43阶段	断开C-D临时连接	55阶段	顶升梁段无索区梁段预拱
44阶段	断开无索区加劲梁连接	57阶段	I-H刚接
45阶段	顶升无索区加劲梁预拱度	58阶段	下放IH-1
46阶段	塔处无索区梁段DEFGD刚接	59阶段	下放IH-2
47阶段	下放无索区梁段DEFGD-1	60阶段	H-B合龙
48阶段	下放无索区梁段DEFGD-2	61阶段	H-B临时连接
49阶段	C-D合龙	62阶段	梁端无索区体系转换完成
50阶段	C-D临时连接	—	—

3)在求解后的结果中提取47阶段桥塔无索区各支承点的竖向位移 $Y_2$ ,则第2次在45阶段设置的支座沉降位移(加劲梁顶升值)为 $S_2=S_1+Y_2-Y_0$ ,并再次代入模型求解。

4)如此反复迭代直至 $S_n-S_{n-1}=0$ ,则此时即达目标状态, $S_n$ 即为所求。

#### 4.4.2 C-D梁段合龙时强制力的计算

桥塔无索区合龙前(即C-D梁段合龙)梁段之间存在错位,要想实现梁段间的合龙就必须在梁段间施加强制力来消除错位。根据模型的施工阶段:40阶段是全桥加劲梁的合龙阶段,49阶段是桥塔无索区的合龙阶段。因此,对于桥塔无索区来说,这两个阶段是近似等效的。为准确模拟加劲梁的吊装过程,模型中梁段之间采用主从关系来模拟。因此可以通过计算40阶段梁段C-D间的主从内力来确定49阶段需施加的强制力的初始值,再以此初始值进行迭代,便可很快收敛得到强制力的准确值。具体计算方法如下。

1)设成桥线形中C-D之间的错位为 $Y_0$ ,首先计算合龙之前(48阶段)C-D之间的错位 $Y_1$ ,则需要强制力克服的错位差为 $S_1=Y_1-Y_0$ ,此时还没有施加强制力,因此对应的强制力 $F_1=0$ 。

2)在合龙阶段(49阶段)C-D梁段间施加强制力为 $F_2$ (40阶段C-D间的主从内力),计算出49阶段C-D之间的错位 $Y_2$ ,则需要强制力克服的错位差为 $S_2=Y_2-Y_0$ 。

3)假设强制力与错位之间呈线性变化,要使错

位差 $S_3=Y_3-Y_0=0$ ,需要在49阶段施加的强制力为 $F_3=F_2+(F_2-F_1)/(S_2-S_1)\times(-S_2)$ 。

4)如此反复迭代直至 $S_n=Y_n-Y_0=0$ ,则此时即达目标状态, $F_n$ 即为所求。

#### 4.5 计算结果

表2是桥塔无索区体系转换过程中梁段纵坡的变化情况。各工况坡度的变化反映了这个过程中加劲梁线形的调整情况,从表中可以看出,体系转换完成之后(62阶段)的梁段坡度与合龙时(40阶段)的坡度是一致的,这就说明无索区的线形与成桥线形是吻合的。

表2 桥塔无索区梁段纵坡变化

Table 2 The longitudinal grade change of girder segments without hangers near the tower

工况号	%				
	D	E	F	G	D
40	2.74	2.82	2.79	2.79	2.82
45	2.63	2.70	2.58	2.48	2.51
47	2.52	2.60	2.57	2.57	2.60
52	2.77	2.83	2.80	2.79	2.81
62	2.74	2.82	2.79	2.79	2.82

#### 4.6 工程执行结果

表3为成桥状态塔区梁段线形,最大误差为0.9‰,可见无索区加劲梁线形平顺,完美地逼近设计线形,表明体系转换相当成功,计算方法和操作工艺正确。

表3 成桥状态塔区梁段线形

Table 3 The girder segments curve near tower of the reasonable design state

无索区梁段编号	实测纵坡/%	设计纵坡/%	纵坡误差/%
D	2.523	2.500	0.2
E	2.440	2.500	-0.6
F	2.523	2.500	0.2
G	2.409	2.495	-0.9
D	2.495	2.467	0.3

## 5 结语

三跨连续加劲梁悬索桥的无索区加劲梁刚接及在体系转换时如何保证无索区的线形平顺过渡、顺利进行体系转换、确保成桥线形与内力一致是一

个难度较高的技术课题。本文分析和讨论了悬索桥无索区梁段体系转换的常用方法及线形调整和控制技术,并以实际工程为例介绍了临时支架法应用,提出了该方法的操作步骤和计算控制方法,最终使实际应用的工程在无索区完美顺接,本文的方法可供同类桥梁参考。

## 参考文献

- [1] Niels J Gimsing. 大贝耳特海峡: 东桥[M]. 西南交通大学, 中铁大桥局集团武汉桥梁科学研究院, 译. 成都: 西南交通大学出版社, 2008.
- [2] 唐茂林, 许宏亮, 沈锐利, 等. 西堠门大桥无索区梁段线形调整与控制[J]. 公路, 2009(1): 43-47.
- [3] 潘世建, 杨盛福. 科研·试验·专用技术标准[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [4] 唐茂林. 大跨度悬索桥空间几何非线性分析与软件开发[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.

# The curve adjustment method of girder segments without hangers for suspension bridge with three-span continuous stiffening girder

Qi Zhaochen<sup>1</sup>, Tang Maolin<sup>2</sup>, Cui Bing<sup>3</sup>, Dong Meng<sup>3</sup>, Wang Ming<sup>2</sup>

(1. Nanjing Major Road & Bridge Construction Commanding Department, Nanjing 210033, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 600031, China;

3. CCCC Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China)

**[Abstract]** It is a difficult technical problem to make sure that the curve of girder segments without hangers is transitioned smoothly and the system transformation is successful and that the internal force keeps consistent with the girder curve when connecting the segments near the tower rigidly and transferring structure system for the suspension bridge with three-span continuous stiffening girder. The system transformation methods at home and abroad of girder segments without hangers are discussed in this paper, and by taking a suspension bridge of over 1 000 m with three-span continuous stiffening girder as an example, the system transformation, curve adjustment and construction control of the girder segments without hangers are realized.

**[Key words]** suspension bridge; stiffening girder; region without hangers; curve