

中承式连续梁拱组合式桥梁无支架施工的挠度控制

张 浩, 陈钦治, 黄 钢

(浙江省义乌市城市规划设计研究院, 浙江义乌 266321)

摘 要: 本文结合浙江省内的一座中承式连续梁拱组合式桥梁碧云桥的设计与施工实践, 从介绍桥梁成桥状态的优化原理着手, 随后重点阐述了中承式连续梁拱组合式桥梁先后梁法施工结构预拱度设置的方法以及影响挠度控制的主要因素, 从而提出了可行的挠度控制方案, 确保了结构的合拢精度和成桥线形。

关键词: 连续梁拱组合桥梁; 钢管混凝土; 施工分析; 挠度控制

中图分类号: U448.216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-7716(2006)02-0088-05

0 引言

近些年来, 梁拱组合式桥梁在国内得到了迅速发展, 特别是钢管混凝土技术、泵送混凝土工艺、预应力技术等施工技术的发展, 使梁拱组合式桥梁作为一种大跨度的新型结构形式, 其数量、跨度以及宽度呈大幅上扬的发展趋势。

梁拱组合式桥梁与斜拉桥、悬索桥都是典型的三元结构, 即由活载分布构件、传递构件及承重构件组成。在梁拱组合式桥梁中, 加劲梁为活载分布构件, 吊杆为传递构件, 而拱肋及加劲梁均作为承重构件。

以上三种桥梁结构体系有一个共同特征, 可以通过调整传递构件的初始张力值, 使加劲梁的恒载内力或线形达到某一种期望状态。连续梁拱组合式桥梁结构中, 可以通过适当调整吊杆的索力, 改善加劲梁的内力状态或线形要求, 达到成桥后的比较理想的结构状态。

本文结合笔者对连续梁拱组合式桥梁无支架(先拱后梁法)施工挠度控制和组织实施的亲身体会阐述了连续梁拱组合式桥梁施工的挠度控制方法以及影响挠度控制的各种因素。

1 成桥状态的最优化原理

最优化的成桥状态, 数学上可描述为

$$\begin{aligned} \min U(x) \\ g_i(x) \geq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n_1) \\ h_i(x) \leq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n_2) \end{aligned} \quad (1)$$

及

$$\min J(y, u) \quad (2)$$

$$u \in \bar{U}, y \in \bar{Y}$$

式(1)中: $U(x)$ ——成型后桥梁结构的应变能

$$g_i(x) (i=1, 2, \dots, n_1); h_i(x) (i=1, 2, \dots, n_2)$$

——结构状态参数的约束范围

x ——所取与应变能 U 有函数关系的、施工期结构状态变量 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 之整体

这里, 式(1)表示的数学问题为一非线性规划问题。

式(2)中: $J(y, u)$ ——描述成型后结构线形状态偏差与控制的函数

y ——构件施工初始线形有关的状态变量

u ——成型线形的控制变量

$u \in \bar{U}$ ——线形控制的约束条件

$y \in \bar{Y}$ ——线形状态的允许范围

式(2)所表示的数学问题为一离散、线性、确定性系统目标的求解问题。

以上描述最优成桥状态的数学式中, 式(1)主要是针对成桥后结构内力状态优化的, 当然其中可通过约束条件对个别结构位移予以限制, 但这种位移只是与应变能相关的位移; 式(2)描述的是与结构施工初始线形定位相关的最终结构线形的优化问题, 其所涉及的位移与结构施工预变位(预拱度)及施工期结构线形纠偏变位有关, 而与应变能无关。

2 施工优化分析

施工优化分析首先是采用数学分析方法求解最优目标状态, 然后将决定最优目标的施工期结构的状态变量变成结构状态的可测变量, 如吊杆张拉力、结构位移等。

2.1 最优目标的求解

在求解使成桥目标最优化的施工期结构状态变

量时,对于必须同时进行结构成型内力和线形优化的桥梁,在建立了目标函数式(1)、(2)及约束条件之后,应首先优化目标式(1),再根据式(1)优化后形成的结构线形进行目标式(2)的优化;而对于仅需进行成型线形优化的桥梁,则只需对目标式(2)进行优化。针对目标函数(1)所表示的数学问题为一非线性规划问题,可采用“可变误差多面体调优算法”,并通过计算机程序求解;至于目标函数式(2)所描述的一个离散、线性、确定性系统的数学问题,可根据目标函数优化要求,对式(2)的有关参数求偏导数,使其转化成线性方程的求解问题。

2.2 结构状态可测变量形成的方法

从施工优化分析的基本思想和成桥目标及约束条件形成的方法中可知,只要得到式(1)及式(2)的最优解,同时也就形成了施工优化分析信息。显然,当结构完全线性时,这种解将是成桥状态施工优化分析的精确解。然而,混凝土桥梁,尤其是大跨径、非线性影响较为明显的结构,必须经过一个迭代过程。

对于从式(1)得到的最优解 $x^*, x_i^* (i=1, \dots, n)$, 若结构非完全线性时,采用 $\alpha=0.6 \sim 0.8$ 的系数修改 x^* , 将有助于加快收敛速度。故取

$$x_\alpha = \alpha x_i^* (i=1, \dots, n) \quad (3)$$

作为施工优化分析的变量,接着建立 $x_i^* (i=1, \dots, n)$ 与施工阶段结构状态可测变量的关系式

$$F_j = \sum_{i=1}^n K_{ji} x_\alpha (j=1, \dots, m) \quad (4)$$

式中: $F_j (j=1, \dots, m)$ 为有关施工阶段结构状态的可测变量,如吊杆张力、结构位移等; $K_{ji} (j=1, \dots, m, i=1, \dots, n)$ 为 $x_\alpha (i=1, \dots, n)$ 对 $F_j (j=1, \dots, m)$ 的影响系数。

在 $x_\alpha (i=1, \dots, n)$ 的作用下,经过向前的施工分析,将形成新的成桥状态,然后再从新求解式(1)及计算式(3),并累加 $F_j (j=1, \dots, m)$ 。重复进行以上步骤,直至 x_α 收敛于零,亦即 $x_\alpha (i=1, \dots, n)$ 趋近于零。

由(2)式得到的最优解 $y^*, y_i^* (i=k+1, \dots, n)$, 即为未建结构部分的最优线形。取

$$y_\alpha = \alpha (y_i^* - y_i^0) (i=k+1, \dots, n) \quad (5)$$

作为施工优化分析的变量,式(5)中的 $y_i^0 (i=k+1, \dots, n)$ 为求解 y^* 之前未建结构部分的成型线形;结构完全线性时 $\alpha=1$, 否则 $\alpha=0.6 \sim 0.8$ 。

在形成施工期结构状态可测变量,即预拱度时,结构线形控制点初始预变位(预拱度)可表示为如下迭代计算式:

$$y_n^j = y_n^{j-1} + y_\alpha (i=k+1, \dots, n) \quad (6)$$

式中: $y_n^j, y_n^{j-1} (i=k+1, \dots, n)$ 分别为第 $j, j-1$ 次迭代得到的线形控制点初始预变位(预拱度)。首次计算时,对于现场浇筑施工方法 $y_n^0 (i=k+1, \dots, n)$ 取为零;而对于预制拼装施工方法,可先把线形控制点上各构件之间的连接作成切线相连的方式,然后再形成 $y_n^0 (i=k+1, \dots, n)$ 。

至于未建结构部分的最优线形的迭代过程可表示成:求式(2)的最优解,计算式(5)、(6),向前施工分析形成新的成桥线形,直至 $y_\alpha (i=k+1, \dots, n)$ 趋近于零。

3 连续梁拱组合式桥梁吊杆初始张拉力的确定

在设计连续梁拱组合式桥梁时,确定整个结构在恒载自重作用下的初始状态,关键在于如何计算吊杆在恒载自重作用下的初始张力。连续梁拱组合式桥梁不仅外部是超静定的,而且内部也是高次超静定的结构。因此,不同的吊杆初始张力会导致结构中的内力状态不同。在恒载自重作用下,可以调整吊杆的初始张力,使加劲梁中的弯矩分布均匀,达到一个理想的水平,可称之为最小弯矩法,以改善加劲梁受力;或者在恒载作用下,使加劲梁的成桥线形达到某种期望的线形,称之为给定位移法。同时,也可以使吊杆初始张力等于指定值,或者使一部分内力和一部分现形符合事先假定值。

通常,理想的成桥状态确定可通过假定吊杆刚度无穷大,即每一根吊杆两端无位移差,进行优化而确定。通常除保证拱肋和加劲梁在吊杆节点处无位移差外,还对吊杆内力间相互关系进行约束。一般地,在成桥状态吊杆内力最好比较均匀,相邻吊杆的内力相差不应过大,通常取边上两根吊杆内力为中间吊杆内力的 $0.4 \sim 0.6$ 倍,而中间吊杆内力相对比值为1。

连续梁拱组合式桥梁无支架施工,其吊杆的初始张力已定,而需要控制的就是加劲梁的成桥线形,也即挠度控制。

4 碧云桥简介

4.1 工程概况

碧云桥分跨为 $(20+60+20)$ m。碧云桥立面布置图见图1所示。

碧云桥为三跨中承式连续梁拱组合式桥梁,也常常被称为“飞鸟式”拱桥。其承重构件为钢管拱肋及加劲梁,设三幅分列,钢管拱肋之间不设风撑。人

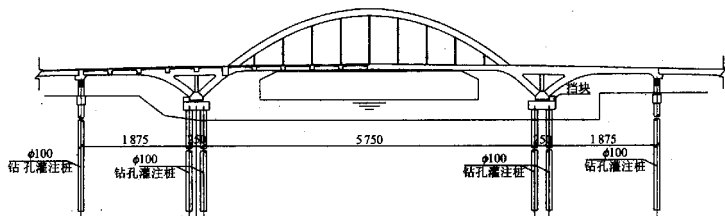


图1 碧云桥立面布置图

行道用悬臂板挑出,桥宽为 $2 \times (0.25 + 4.75 + 12.0 + 1.0)$ m,肋中距为 13.75 m。主跨拱轴线采用二次抛物线,矢跨比 $f/l=1/3.94$ 。

桥面以上拱肋为钢管混凝土,桥面以下拱肋为钢筋混凝土。钢管拱肋尺寸: $b \times h=1.5 \times 1.2$ m(中), $b \times h=1.0 \times 1.2$ m(边);加劲梁尺寸: $b \times h=2.0 \times 1.16$ m(中), $b \times h=1.25 \times 1.16$ m(边),边加劲梁是带悬臂板 3.75 m 及栏杆 0.25 m 的 T 梁。加劲梁间设置间距为 5.0 m 的 T 形横梁,主车道横向坡度由横梁顶面调节,横梁底面水平,横梁高度为 88~70 cm。

吊杆采用成品束,墩头锚具及 P.E 采色护套,中肋及边肋分别采用镀锌 55 Φ 及 37 Φ 7 的平行钢丝,在桥面以上 2.2 m 范围内设不锈钢护套。吊杆的固定端在钢管拱肋顶部,张拉端在加劲梁梁底。

混凝土材料:加劲梁、横梁、钢管混凝土及桥面板均为 50 号,但钢管混凝土添加了微膨胀剂,桥面铺装为 30 号。

4.2 施工方法介绍

(1) 搭设满堂脚手架浇筑墩横梁混凝土,混凝土达到设计强度后张拉预应力束并锚固。

(2) 利用已建承台与已有驳岸或临时钻孔灌注桩,架设根据该桥需要而设计并加工焊接好的桁架,在桁架上搭设脚手架现浇边跨至钢管拱脚“0”号块的加劲梁、人行道板混凝土。

(3) 吊装边跨预制的中横梁并安装定位,现浇中横梁与加劲梁湿接头及钢管拱脚附近的加强横梁。边跨中横梁扣除两边各 50 cm 的湿接头,整根预制。

(4) 张拉边跨加劲梁下缘部分预应力束及中横梁部分预应力束。拆除边跨钢管拱脚“0”号块满堂支架。在托架上浇筑边跨桥面板混凝土。

(5) 整孔架设钢管拱肋,在钢管拱肋 1/3 处向两边各生两根缆风绳进行拱肋轴线的调整,拱轴线

调整到一条直线上时,将缆风绳固定。然后采用插销固定拱肋并焊接钢管拱脚接口。钢管拱肋之间在拱顶偏下对称布置两根临时风撑。钢管拱肋在厂内分 5 段进行预制生产,现场拼装成整根拱肋。

(6) 钢管拱产生的水平推力利用设置于加劲梁中的体外预应力束张拉力部分或完全抵消,体外预应力张拉力数值始终以拱座纵向的水平位移不超过 ± 2 cm 为限。每根体外预应力束初始张拉力不小于 70 t。

(7) 钢管拱脚及四分点处各开一个灌注孔,用带闸门的进料支管连接。钢管拱顶开一排气孔,并用一根 $\Phi 20$ cm 高 1 m 的增压钢管连接。

(8) 钢管拱肋混凝土采用两端泵送顶升法压注。由高压泵将混凝土从拱脚灌注孔处连续不断地灌注到钢管拱内,只要在拱顶增压管内溢出的混凝土浓度与灌注的混凝土浓度相同时,即可停止压注。

(9) 安装吊杆。钢管拱混凝土达到设计强度后即可吊装中跨预制的中横梁,吊装次序按先边后中。中横梁的安装标高按照设计标高及成桥线形的预拱度进行安装定位。中横梁吊装过程中,应始终观测拱座纵向的水平位移,以不超过 ± 2 cm 为限进行体外预应力束的张拉。中跨横梁与加劲梁节段、人行道板节段一起预制,包括加劲梁在内,中横梁分三段预制。

(10) 中横梁安装定位后,先浇筑加劲梁湿接头及横梁湿接头混凝土,湿接头混凝土达到设计强度后张拉加劲梁及中横梁部分预应力束,然后再浇筑人行道板及桥面板混凝土。以上湿接头混凝土的浇筑在托架上进行。

(11) 张拉加劲梁、中横梁及桥面板预应力,浇筑加劲梁顶面体外预应力束位置处的混凝土,将体外预应力永久地转化为体内预应力。

(12) 结构合拢后进行桥面铺装及附属设施的施工。

5 挠度控制

5.1 结构预拱度的设置

中承式连续梁拱组合式桥梁先拱后梁法施工时的挠度组成有:钢管混凝土拱安装中跨横梁时连续体系的挠度;体系转换后梁拱体系的挠度和成桥后由恒载、活载及体系后期收缩徐变引起的挠度。由于挠度的计算涉及到计算图式、临时荷载模拟、混凝土浇筑过程的模拟、预应力模拟、后期恒载、活载的影响以及长时间的徐变的影响等等,所以挠度的精确计算实际上极其复杂,因而,在施工控制之前应反复较核计算数据并与设计数据比较从而发现问题。而在施工控制过程中,也应根据实测的标高数据修正结构分析参数。

综上所述,结构预拱度的设置包括:结构施工过程中的预变位,可由成桥后恒载及体系后期徐变引起的挠度确定;成桥后活载引起的预变位。

5.2 挠度监测

为正确反映桥梁施工的变位,把加劲梁梁底标高作为挠度控制的目标。每节段变位监测点从梁底测点经腹板引到加劲梁顶面,在加劲梁顶面预埋钢筋,露出钢筋头,由钢筋头监测点的标高直接反映结构的变位情况。中横梁的安装也是通过调整钢筋头的标高而达到挠度控制的目的。

5.3 影响挠度控制的因素

影响中承式连续梁拱组合式桥梁先拱后梁法施工挠度控制的因素很多,以下就6个主要的因素做一些分析。

5.3.1 混凝土弹性模量 E_c

JTJ 023-85 规范规定短期荷载作用下受弯构件的刚度对于全预应力混凝土构件采用 $0.85 E_c I$, 其中 E_c 为混凝土的割线弹性模量, I 为构件换算截面惯性矩。此规定的实质即对于全预应力混凝土构件在短期荷载作用下受弯构件混凝土的弹性模量采用 $0.85 E_c$ 。由于混凝土弹性模量的取值大小对于结构的计算分析有非常重要的作用,而施工现场混凝土弹性模量试验要做到试块的受力与真实构件的受力相一致,这实质上有很大的困难,从而一般导致试验得到的混凝土弹性模量数值偏大。因而建议一般按规范取值,然后根据实测数据适当修正。

5.3.2 钢管混凝土组合构件

钢管混凝土结构属于钢-混凝土组合结构的一种,其受力模拟的正确与否在挠度的计算分析中起到重要的作用。钢管混凝土在不同的施工阶段起到

不同的作用。钢管整孔吊装就位后到混凝土浇筑完毕直到达到设计强度的过程中,均作为劲性骨架发挥作用。之后,中跨横梁吊装的过程中,钢管及混凝土结合成一体成为组合构件发挥劲性骨架的作用。在挠度控制的计算分析中引入了“层”概念,将钢管与混凝土视为两个不同的“层”,各有自己的物理特性和几何特征。

5.3.3 加劲梁截面刚度

加劲梁在先拱后梁法施工的不同阶段,都被赋予了不同的几何概念。碧云桥边跨加劲梁与人行道板混凝土一起浇筑后,按照“T”梁有效宽度的规定,加劲梁作为带单悬臂的“T”梁构件参与受力;而在边跨桥面板浇筑之后,又成为了“T”梁构件。中跨横梁吊装时,加劲梁均作为外部荷载作用于钢管混凝土拱肋上而不参与结构的受力;待加劲梁湿接头混凝土浇筑之后又作为矩形梁参与结构受力,桥面板及人行道板混凝土浇筑达到设计强度后,加劲梁又成为了“T”梁。因而,加劲梁在整个施工过程中,不同的部分参与不同阶段的受力,不同阶段张拉的预应力也作用于具有不同几何特征的加劲梁上,由此导致加劲梁受力构件的模拟成为挠度计算的关键所在。在此,加劲梁截面特性的描述又采用了“层”概念,矩形梁、桥面板有效宽度以及人行道板有效宽度均作为独立的“层”参与结构的受力。

5.3.4 体外预应力

碧云桥先拱后梁法施工的关键在体外预应力的施加。体外预应力将施工过程中钢管拱肋产生的水平推力部分或完全抵消,从而保证结构施工的稳定,控制结构的位移在较小的范围内变动。在整个施工过程中,体外预应力先作为外在的力源作用于梁拱结构上,而后在加劲梁顶面位置处的混凝土浇筑后,体外预应力永久地转化成体内预应力。预应力经历体外到体内两个过程,可见其精确的力学模拟对于挠度的精确计算有着重要的影响。

5.3.5 温度影响

温度影响是挠度控制中较难掌握的因素,主要是因为温度随气候影响而变化无常,而且结构的各个部分在同一时刻也存在显著的温差。钢管混凝土拱桥的温差特征尤其明显。温差影响体现于碧云桥上有三种情况:均匀温差、桥面温差以及钢管内外温差。所以,在结构计算分析中不把温差影响作为独立的工况,而是将其单独列出,根据其影响而做修正。

温度影响时刻存在,但其对挠度控制的影响主

要体现于横梁的吊装定位。为了减小温度对于结构挠度控制的影响,可以通过选择合适的施工时间而达到目的。譬如,钢管混凝土的浇筑选择在深夜施工,同时钢管拱通过浇水降温,从而可以保证混凝土在常温下浇筑。横梁的吊装定位选择在清晨或傍晚施工,减小温差对于结构的影响而确保横梁定位标高的准确性。

5.3.6 混凝土收缩徐变

混凝土收缩徐变对于结构的影响是客观存在的,因而在挠度计算时必须加以考虑。影响混凝土收缩徐变的因素很多,故而在建立结构计算模型时应尽量把一些确定性的因素估计正确,比如临时荷载、永久荷载及其加载时间,还有影响混凝土收缩徐变参数的混凝土配合比等等。

5.6.4 挠度控制方法

碧云桥采用无支架(先拱后梁法)施工,其吊杆的初始张拉力已定,而需要控制的就是结构的成桥线形也即挠度控制。

类似于其他桥梁的施工控制,中承式连续梁拱组合式桥梁先拱后梁法施工的挠度控制也是一个预告→施工→测量→识别→修正→预告的循环过程。挠度控制就是根据施工监测所得的结构参数真实值进行施工阶段计算,确定每个预制节段的安装标高,并在施工过程中根据施工监测的成果对误差进行分

析、预测和下一预制节段的安装标高进行调整,以此来保证成桥线形、合拢段两悬臂端标高的相对偏差不大于规定值。

6 结语

挠度控制的组织与实施,不仅能起到指导施工的作用,而且更能优化结构的成桥线形。笔者在深入理解桥梁成桥状态优化理论的基础上对碧云桥无支架施工进行详细的施工分析,综合考虑影响挠度控制的各种因素,然后根据计算分析的结果组织施工控制,确保了结构的合拢精度及成桥线形。

参考文献

- [1]李国平. 桥梁成型状态的施工期优化[J]. 同济大学学报, 1999, (1).
- [2]金成棟. 预应力混凝土梁拱组合桥梁—设计研究与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [3]刘跃华. 连续梁桥悬臂浇筑施工挠度控制的因素分析[J]. 上海公路, 2000, (2).
- [4]蒋彦征. 预应力混凝土梁拱组合桥—系杆拱桥性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [5]陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [6]向中富. 桥梁施工控制技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

珠江水系要抓紧治理

不久前召开的珠江流域水资源保护工作会议透露, 2004 年度珠江流域污水排放总量 182 亿 t, 其中入河废污水量 139 亿 t, 珠江三角洲废污水排放量占总量的 52%。

如今担负珠江主要供水功能的部分江河水质下降, 城市饮用水源水质达标率偏低。在流域综合规划调查的 79 个水源地中, 合格率只有 69.5%。

最新监测表明, 珠江口近 6000 km² 水域水体中的重金属、无机氮、石油类几乎 100% 超标, 伶仃洋绝大部分海域水质综合污染指数达到重污染水平, 近岸海域无机氮超过四类海水水质标准, 营养盐比例严重失衡。

水利部珠江水利委员会主任岳中明指出: “过去 20 a, 珠江上游省区经济发展晚了一步, 珠江三角洲区 80% 的上游来水是珠江三角洲污水的稀释剂, 然而这样的局面正在面对上游地区经济起飞的挑战。”

目前, 珠江口已成为华南第一大、国内第二大污染型口岸。水利专家发出警告称, 由于珠江水系绿色覆盖率降低, 抵御自然灾害的能力严重衰退, 如果再不抓紧治理, 将会真正变成第二条黄河。

(上海市老科协土建委组稿)

· 短讯 · 据悉, 今明 2 年将成为上海地铁建设的大年, 今年上海用于地铁建设的投资将超过去年 70% 以上, 今年内上海还将有地铁 2 号线西延伸段通达虹桥机场、地铁 3 号线北延伸段通达宝钢投入试运营。