

多跨倾斜PC连续梁桥预拱度设置方法

廖宗熙¹, 李元松¹, 叶绍其², 郑和智¹

(1. 武汉工程大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430073; 2. 中铁大桥局集团第五工程有限公司, 江西 九江 332001)

摘要: 预拱度的设置关系到车辆高速运行的舒适性和安全性。为解决大跨径桥梁悬臂施工过程中桥梁预拱度线形不达标的问题, 适应桥梁实际工程特点, 提出一种考虑结构自重、预应力、收缩徐变效应、汽车荷载和温度效应等多种影响因素的预拱度设置和调整方法。以南昌某多跨倾斜PC连续梁桥为背景, 基于设计文件和MIDAS Civil程序, 建立空间杆系结构纵向计算模型, 对该桥的施工过程进行了模拟计算, 得到了各节梁段的预拱度并用于指导施工。监控结果表明: 大桥成桥线形高程与监控成桥高程误差符合规范要求, 二者高差绝对值不超过20 mm, 所提方法理论清晰、简便可行。

关键词: 多跨PC连续梁桥; 悬臂施工; 数值模拟; 预拱度设置方法; 影响因子

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)01-0069-06

Precamber Setting Method for Multi-span Inclined PC Continuous Beam Bridge

LIAO Zongxi¹, LI Yuansong¹, YE Shaoqi², ZHENG Hezhi¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China; 2. China Railway Bridge Bureau Group Fifth Engineering Co., Ltd., Jiujiang 332001, China)

Abstract: The setting of precamber is related to the comfort and safety of high-speed vehicle operation. In order to solve the problem of substandard precamber alignment in the cantilever construction process of long-span bridges and adapt to the actual engineering characteristics of bridges, a precamber setting and adjusting method considering various influencing factors such as structural self-weight, prestress, shrinkage and creep effects, vehicle loads and temperature effects is proposed. Taking a multi-span inclined PC continuous beam bridge in Nanchang as the background, and based on the design documents and MIDAS Civil program, a longitudinal calculation model of spatial truss structure is established. The construction process of the bridge is simulated and calculated to obtain the precamber of each beam segment, which guides the construction. The monitoring results show that the elevation error between the finished bridge alignment and the monitored finished bridge meets the standard requirements. The absolute value of elevation error of the both is less than 20 mm. The proposed method is clear, simple and feasible in theory.

Keywords: multi-span PC continuous beam bridge; cantilever construction; numerical simulation; method for setting precamber; influencing factors

0 引言

采用悬臂施工工艺的预应力混凝土连续梁桥因其地形适应性强, 设计、施工技术成熟, 造价合理, 而在近些年来被广泛采用^[1]。

随着时间的推移, 由于汽车荷载与环境温度等多重因素的共同作用, 使得混凝土连续梁桥的变形日趋

显著。当累积变形超出限定的阈值, 桥梁的平顺性受损, 不仅加大维护难度, 更潜藏着行车安全风险。因此, 预拱度的科学设置, 成为维系桥梁稳定与车辆平稳运行的纽带。其巧妙地抵消了汽车荷载带来的下挠形变, 优化桥梁受力状态, 确保行车路线顺畅。桥梁施工的每个环节都关乎最终成桥后的品质。为确保桥梁精确合龙, 预期线形的精准复制, 施工过程中的线形控制显得尤为重要^[2]。

目前, 计算预拱度的一般公式和国内外大跨径桥梁施工控制成功案例多围绕自重、预应力、收缩徐变效应及汽车荷载等因素对预拱度的影响展开, 却鲜有考虑温度变化和汽车荷载与温度对收缩徐变效应的综合

收稿日期: 2024-08-05

作者简介: 廖宗熙 (1998—), 男, 硕士研究生, 从事桥梁结构研究工作。

通信作者: 李元松 (1964—), 男, 博士, 教授, 从事桥梁结构研究工作。电子信箱: 1308618445@qq.com

影响。从实际施工环境来看,施工现场的温度变化会影响梁体线形和内力变化,其影响力甚至超过结构参数误差。而在桥梁运营阶段,持续不断的车流对桥梁产生长期的作用力,这种汽车荷载对大跨度连续梁桥的长期徐变效应不可忽视,这一关键因素常常被忽视。

李立峰等^[3]参照国外桥梁监控的成功案例,对多种不同类型的混凝土箱梁桥的纵向温度应力作了具体的分析与计算,并且比较了温度敏感性;董旭^[4]通过温度-挠度-时间试验详细分析了温度效应对桥梁预拱度的影响;何天涛^[5]分析了汽车荷载长期效应对徐变挠度的影响;刘本永^[6]等基于车-线-桥耦合振动分析模型,提出了高速铁路无砟轨道大跨斜拉桥考虑桥梁收缩徐变的成桥预拱度设置方法和合理预拱度的判断指标。上述学者在温度效应和收缩徐变效应对连续梁桥预拱度影响方面做了大量的理论分析和实验研究。但是受到实际工程的影响,没有将这两种因素结合起来考虑。鉴于此,本文在以往成功案例的基础上,归纳总结出同时考虑温度效应以及汽车荷载对收缩徐变效应影响的预拱度设置方法。以南昌某多跨倾斜PC连续梁桥为项目为背景,将该方法应用指导大桥的施工。

1 工程概况

1.1 工程背景

东阳特大桥为4跨曲线预应力混凝土连续梁桥,且横截面存在超高及单一纵坡变化,荷载空间分布复杂。主桥采用单箱双室箱形断面,主桥上部结构为4跨变截面预应力混凝土连续箱梁,断面为单箱双室,跨径组合(60 m+2×90 m+60 m)。主梁共分3个悬浇T构,一个T构单侧共分11个节段。支点截面高度5.5 m,跨中截面高度2.5 m,桥面宽度16.55 m。下部结构主墩采用实心板墩。墩身纵桥向宽3 m,横桥向宽与上部箱梁箱宽相同为11.05 m,主梁采用纵、横、竖三向预应力体系,按全预应力构件设计(考虑收缩徐变等不确定因素)。纵向预应力:包括悬浇施工用顶板束、腹板束,中跨合龙顶板束、底板束,边跨现浇段顶板束、底板束。东阳特大桥主桥主梁截面如图1所示。

1.2 施工监测的内容

东阳特大桥主桥施工监测的内容包括:结构线形监测、主要截面应力监测和温度监测。

1.2.1 结构线形监测

连续梁桥线形控制通过对各梁段关键工况进行实时高程和平面测量,当误差超过规范要求,及时在后续

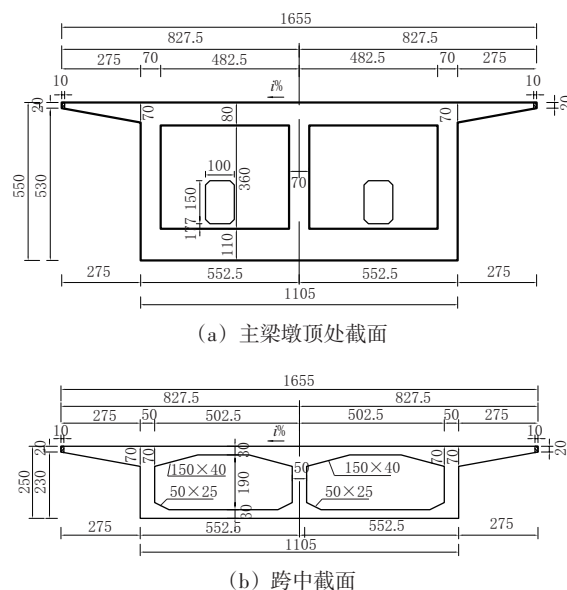


图1 东阳特大桥主桥主梁截面图(单位:cm)

梁段进行调整,确保悬臂施工过程中主梁线形误差控制在设计和规范允许误差范围之内。

移动挂篮至指定位置,在对挂篮底模进行固定后,采用极坐标法确定主梁平面位置。根据设计方案和数值模拟计算结果,确定各梁段控制截面上、下缘控制点的具体坐标和高程,布置控制截面各控制点。此外,在确定各控制点的前提下,采用钢尺进行截面细部尺寸的精确把控。箱梁高程控制以梁体底板控制为主,顶板控制为辅,主梁高程控制主要通过在每个梁段(浇筑前)的监控截面按照如图2所示的高程测点布置图,顶板布置5个测点,底板布置3个测点,测点具体布置在离两侧悬臂端纵向距离5 cm左右,测点采用钢筋头焊接在顶板模板的焊接形式,浇筑后高出顶板混凝土表面1~5 mm为最佳。通过测量各梁段关键工况下各测点挠度相对变化,计算得到主梁高程变化情况。高程测量安排在清晨6:00—8:00时间段内观测并完成。

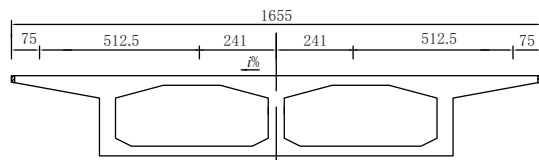


图2 主梁高程控制测点布置(单位:cm)

1.2.2 主要截面应力监测

在实际施工控制过程中,应力和线形控制对桥梁顺利合龙竣工具有非常重要的作用,只有确保每个施工阶段的应力情况在合理范围以内,才能进行下一阶段的施工。为了施工的顺利进行,在每个T构梁箱梁截面上布置应变计,记录每个阶段的应变情况,以形成

结构的预警系统。

主桥每个T构梁两端均布置一个应力测试断面,每个断面布置4个应力测点,应力测试断面测点图及应力测点埋设图如图3和图4所示。

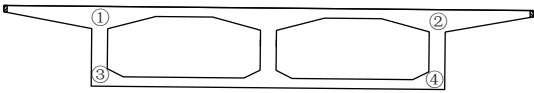


图3 连续梁主桥应力测试断面测点图



图4 应力测点埋设图

1.2.3 温度监测

温度变化不仅会产生温度应力,还会导致梁端挠度变化,这对施工阶段挠度和应力的观测构成了显著干扰。混凝土由于热传导性能不佳,面对环境温度的波动和日照不均,其表面与内部温度差异明显,形成温度梯度。为此,温度测点的布置必须精确捕捉这一梯度的动态变化,以提供准确的监测数据,保障施工安全与质量。主梁每个T构梁温度测试截面与应力监测断面一致,每个断面斜对角布置2个温度传感器。每一施工阶段,随着应力一同测量。

2 计算原理

由于挂篮悬臂施工法的独特性质,大跨径连续梁桥在完工之前需要经历一个相当繁琐和漫长的建设阶段。因此,对大跨度桥梁施工全过程进行精确模拟是非常重要的。施工初期的控制措施直接关系到桥梁的状态,因此,在施工过程中对每个阶段的内力和变形进行计算和分析,已经变成了施工控制的核心部分。

2.1 分析方法

前进分析法与倒退分析法是较成熟的施工控制的分析方法。

前进分析法,亦称作正装计算法,遵循设计和施工的顺序来进行计算。这种方法的核心特征在于结构形式、边界条件以及荷载类型随着施工进程的不断变化而变化。由于前期结构的徐变和几何位置的调整,每个施工阶段的结构计算都是基于前一阶段的结构状态进行。

倒退分析法,也称倒装计算法。这种方法的核心

思想是:从某个特定时刻 $t=t_0$ 开始,假设此时结构的状态符合前进分析法在 t_0 时刻得到的结果,并且轴线符合设计的线形。在这个初始状态下,通过逆向执行前进分析的步骤,逐步拆解结构,并评估每一步拆解对剩余结构的影响。

前进分析方法有效地重现了结构施工的实际过程,可以精确地评估各施工阶段的位移与应力。因此,本次施工监控运用前进分析法模拟挂篮悬臂现浇的施工过程。计算流程如图5所示。

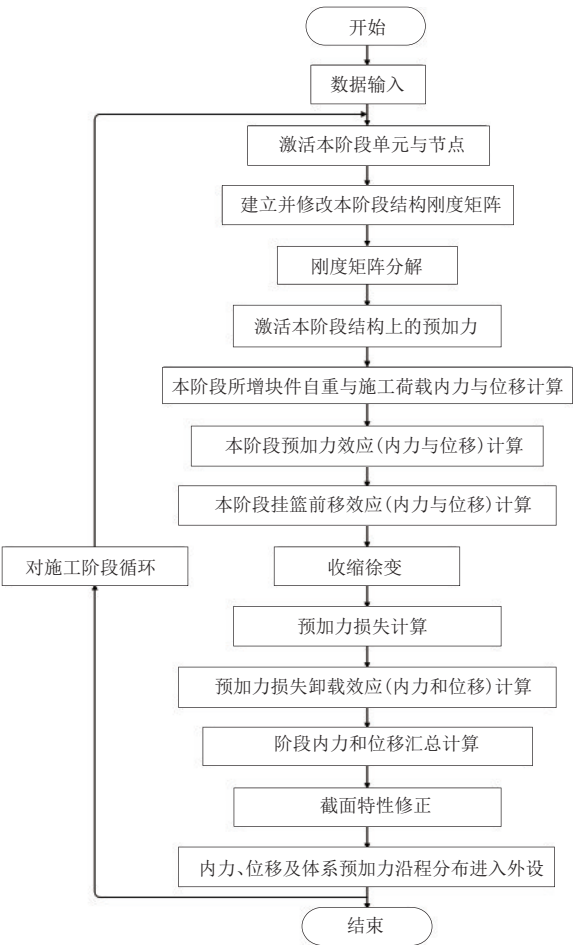


图5 计算流程图

2.2 误差调整方法

在施工控制的过程中,受到多方面因素的影响,导致结构的实际受力状态与理想状态之间存在一定的差距。为了尽可能消除这种误差,我们需要对未施工的部分进行预测,以确保最终结构能够达到理想的形状和内力状态。常用的方法有:参数识别修正法(自适应控制法)、预测控制法和线形回归法^[4]。根据国内外施工控制成功案例,对于多跨倾斜PC连续梁桥,采用参数识别修正法(自适应控制法)进行施工控制时,能最大限度地消除每座桥的个性特征和实际施工环境的地域性特征造成的误差影响。施工控制误差出现时按照

表1 误差调整的基本原则

施工控制误差	调整方式
<±10 mm	误差不作调整
±10 ~ ±20 mm	后续节段调整一半
>±20 mm	后续2节段调整

采用自适应控制法对施工线形调整的方法见图6。

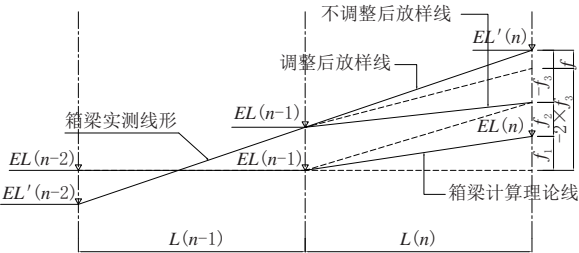


图6 自适应控制法示意图

图6中线形偏差处理,可由以下公式表达:

$$f_1 = EL(n) - EL(n - 1) - [EL(n - 1) - EL(n - 2)] \times L(n) / L(n - 1) \tag{1}$$

$$f_1 = EL(n) - EL(n - 1) - [EL(n - 1) - EL(n - 2)] \times L(n) / L(n - 1) \tag{2}$$

$$EL'(n) = f + EL'(n - 1) + [EL'(n - 1) - EL'(n - 2)] \times L(n) / L(n - 1) \tag{3}$$

$$f_3 = -[EL'(n - 1) - EL(n - 1)] - [EL'(n - 2) - EL(n - 2)] \times [L(n) / L(n - 1)] / 2 - [EL'(n - 1) - EL(n - 1)] / 2 \tag{4}$$

$$f = f_1 + f_2 + f_3 \tag{5}$$

式中: f_1 为结构自重的预拱度; f_2 为挂篮预拱度; f_3 为预拱度调整值; f 为最终预拱度; $L(n)$ 为第 n 号节段长度; $EL'(n)$ 为 n 号节段实测标高; $EL(n)$ 为 n 号节段计算理论标高。

3 合理预拱度设置

3.1 预拱度的影响因素

对于大跨径PC连续梁桥,除了设置施工预拱度来尽可能消除桥梁在建设周期内诸多因素对桥梁线形的影响外,还需要对梁段高程预留一定高度防止运营阶段的梁体受汽车荷载与长期收缩徐变效应等因素引起的下挠,即设置成桥预拱度。本次预拱度的计算,考虑的影响因素如下。

3.1.1 结构自重的影响

结构自重的影响一般分为节段浇筑时挂篮的弹性变形和挂篮自重引起的结构变形。在桥梁施工的过程中,挂篮这一关键设备,安装在已完成的节段之上,挂篮本身的自重会使得桥梁整体结构产生微小的变形,

但随着挂篮的移除,原先那些由它自重所引起的变形又得到了恢复。然而,挂篮设备悬臂,在浇注混凝土的过程中,随着结构重量的逐步累加,自身亦会发生挠曲变形,进一步导致永久性结构出现相应的变形。需要注意的是,这部分的变形,在挂篮拆除后,不能恢复原状^[7]。

对于现浇1号节段混凝土的施工过程而言,挂篮设备的自重,完全作用在0号节段上的。然而,随着混凝土重量的不断增加,挂篮设备上的悬臂逐渐承受了更大的压力,从而发生了弹性变形。这种变形,同样发生在底模板前端的标高之上,会对下一阶段的施工产生影响。因此,在确定各节点的预拱度值时,我们必须充分考虑这一因素的影响^[8]。

当现浇2号以及之后的节段混凝土时,挂篮设备通常会进行拆分,以两截的形式分别固定在已完成的悬臂节段之上。考虑到挂篮自身的重量,挂篮设备的重心与悬臂梁根部的距离变得较大,这导致了已完成梁段发生了一定程度的变形,进而使得待浇段的模板也呈现出了下垂的趋势。然而,这种变形现象,会随着挂篮的拆除而逐渐得到修复。因此,在设置预拱度时,我们必须预设一个相应的补偿值,以扣除由挂篮引起的这部分影响,从而确保施工质量的精准和稳定^[9]。

3.1.2 预应力的影响

钢绞线的张拉力,也就是预应力会影响预应力混凝土构件的预拱度。这一张拉力在施加过程中会有一些的损失,这种损失将直接影响到构件乃至整个结构的性能表现。在后张法构件中,预应力钢筋与管道壁之间的摩擦阻力是一个不可忽视的因素,它会在一定程度上降低钢筋中的实际应力。而管道的弯曲和位置偏差也会对这一摩擦阻力产生影响。桥梁在使用过程中,预应力损失会逐渐加大,导致对混凝土的压力逐渐减小,从而使得整个结构产生一个向下弯曲变形的弯矩。这种弯矩会导致跨中的下挠,对桥梁的长期使用和安全性产生影响^[10]。因此,对于预应力混凝土构件的设计和施工,我们需要充分考虑预应力损失的影响,并采取相应的措施来降低其影响,从而确保桥梁的安全和稳定^[5]。

3.1.3 收缩徐变效应的影响

混凝土结构的收缩徐变,是指其在干燥过程中体积缩小,同时在汽车等荷载作用下发生的持续变形现象^[11]。预应力混凝土桥梁从建造之初至整个服役期间,均受到收缩徐变效应的影响,且这种影响随时间变化。混凝土收缩徐变不仅是桥梁长期变形的加剧因素,还导致了预应力钢束的预应力损失,对桥梁结构体

系产生深远影响。特别是对于连续梁桥这类典型的预应力混凝土桥梁,其长期服役性能在很大程度上受到混凝土收缩徐变效应的制约,甚至成为限制其跨越能力的主要因素^[12]。

3.1.4 汽车荷载的影响

一般认为,汽车荷载是公路桥梁的主导活载,当车辆驶过桥跨结构时,一方面会引起桥梁结构变形,另一方面还会引起体外预应力钢绞线的疲劳应力幅,造成桥梁的长期收缩徐变变形。

3.1.5 温度变化的影响

温度变化,包括年度的缓慢交替、突然的冷空气袭击,以及日照带来的细微差异。每种变化都对桥梁结构产生深远影响。年度温度变化,如季节的更迭,使得桥梁结构在整体上经历均匀的升温 and 降温。当强冷空气突然袭来,箱梁外部的温度会急剧下降,而内部则保持较高温度,形成内外温差。当太阳辐射照耀在箱梁顶面时,顶面的温度会迅速上升。然而,由于混凝土的导热性能较差,导致腹板、底板和箱内的温度上升得相对缓慢。这种内外温差会在箱梁高度上形成温度梯度,从而影响桥梁的整体稳定性^[13-14]。

3.2 预拱度的计算公式

参考《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)的预拱度计算公式和第 2 节影响理论预拱度因素分析主要影响因素,得出各块预拱度的一般公式:

$$f_i = \sum f_{1i} + \sum f_{2i} + f_{3i} + f_{4i} + f_{5i} + f_{6i} \tag{6}$$

式中: f_i 为总预拱度值; $\sum f_{1i}$ 为当前梁段浇筑和以后各阶段梁段浇筑对该点挠度累计值; $\sum f_{2i}$ 为当前梁段预应力张拉和以后各梁段预应力张拉对该点挠度累计值; f_{3i} 为二期恒载挠度; f_{4i} 为挂篮自重及变形; f_{5i} 为收缩徐变效应经验值; f_{6i} 为活载预拱度。

3.3 预拱度计算结果

3.3.1 有限元模型的建立

本文计算模型依据设计文件和现场施工状况,为保证数值模拟结果与现实桥梁施工的准确性,测量施工现场相应数据,对模型参数进行识别和调整,减小模型计算结果的与实际桥梁施工的误差。基于 MIDAS Civil 程序,建立空间杆系结构纵向计算模型,主梁划分 102 个节点,94 个单元。主桥有限元模型如图 7 所示。

3.3.2 预拱度计算结果

施工阶段预拱度通过计算施工阶段位移,取其反

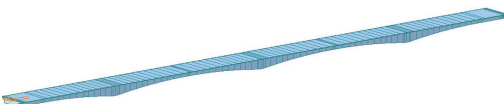


图 7 东阳特大桥主桥计算模型

拱值;活载预拱度取其汽车荷载最大竖向位移一半的反拱值;温度变化对主梁的线形影响,整体升温为 26.8℃,整体降温为-35.9℃。具体计算结果见下图 8 至图 11 所示。

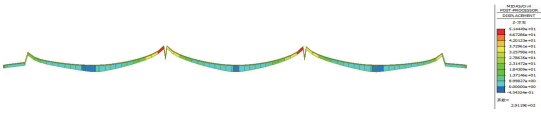


图 8 中跨合龙拆除挂篮后竖向位移(单位:mm)

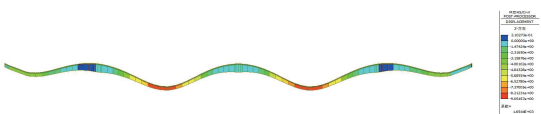


图 9 附属设施施工后竖向位移(单位:mm)

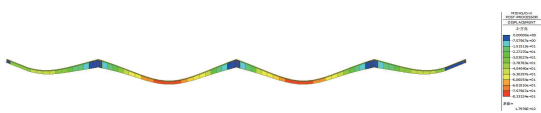
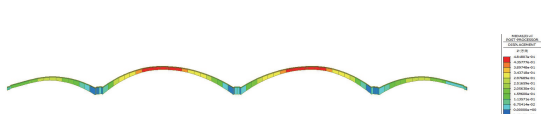
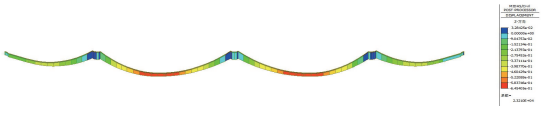


图 10 汽车荷载作用下竖向位移(向下)(单位:mm)



(a) 整体升温工况



(b) 整体降温工况

图 11 温度荷载作用下竖向位移(单位:mm)

有限元计算过程仅仅计算了挂篮自重的影响,没有包含挂篮自身的变形值,根据现场实测挂篮预压数据进行数据拟合,得到每一节梁端的挂篮变形值如图 12 所示。

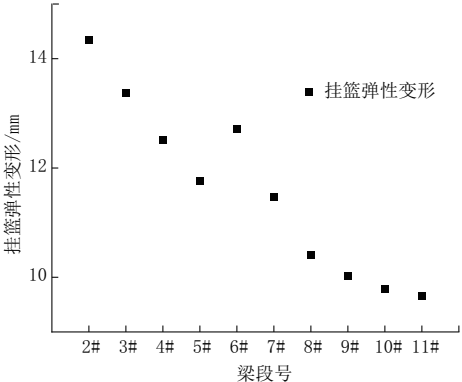


图 12 挂篮弹性变形值

根据目前国内连续梁监控的成功经验,并考虑桥

墩沉降、挂篮自身弹性变形、温度、环境湿度及收缩徐变等长期的影响因素,参考设计图纸,对本桥中跨按最大 $L/1\,000$ 设置经验预拱度,在墩顶为0、边跨 $3/8L$ 处,设置中跨经验值 $1/4$ 的预拱值,其余部位按照余弦函数

$$y = \frac{f_i}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi x}{L} \right) \right] \text{ 计算}^{[15]}. \text{ 经验值如图 13 所示。}$$

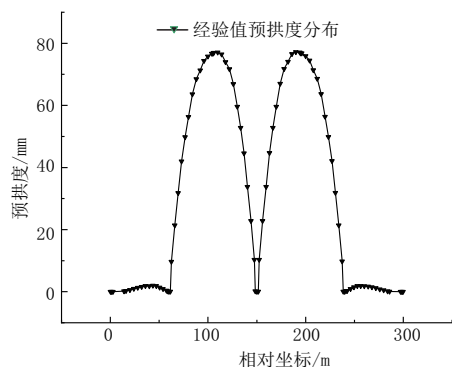


图 13 经验值预拱度分布图

根据公式(6)以及有限元软件的计算结果,得到东阳大桥的理论预拱度分布曲线,如图 14 所示。

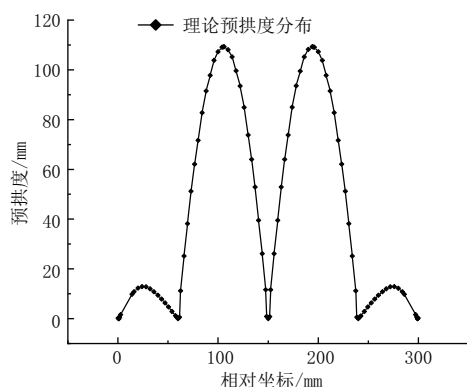


图 14 理论预拱度分布图

3.4 监控结果分析

采用本文所述的预拱度的计算和调整方法对本依托工程进行施工监控,在桥面铺装前对全桥进行通测,数据拟合后与监控高程的对比结果误差图如图 15 所示。主桥3个T构梁段挠度变化与数值模拟计算结果变化趋势相同,大桥成桥线形高程与监控成桥高程误差符合规范要求,二者高差绝对值不超过20 mm,反映了本文采用的理论预拱度的计算和调整方法的准确性与必要性。

4 结 语

本文以南昌某多跨倾斜PC连续梁桥施工项目为背景,根据目前国内连续梁监控的成功经验,归纳总结了结构自重、预应力、收缩徐变效应、汽车荷载和温度效应等多种影响预拱度的主客观因素;提出了一种适应

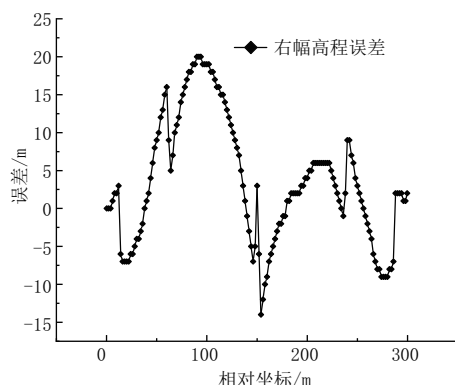


图 15 右幅全桥合龙后主梁顶面高程误差

实际工程的预拱度设置和调整方法。工程实测数据表明:施工过程中线形控制的结果良好,上述预拱度的计算和调整方法,能有效解决桥梁预拱度线形不达标的问题。

该项目的成功实施,为预应力混凝土连续梁桥积累成功案例,为同类桥梁的预拱度设置提供一定的技术借鉴。

参考文献:

- [1] 钟志彬. 特大桥梁悬臂现浇连续梁施工技术分析[J]. 工程技术研究, 2021, 6(5): 93-94.
- [2] 任虹昌, 陈乐平, 骆钦东, 等. 文泰高速葛溪大桥主梁悬臂施工分析[J]. 桥梁建设, 2021, 51(5): 138-143.
- [3] 李立峰, 邵旭东, 程翔云. 混凝土箱形梁桥的温度梯度研究[J]. 中南公路工程, 2001(4): 38-40.
- [4] 董旭. 预应力混凝土连续梁桥施工控制研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [5] 何天涛. 大跨径预应力混凝土梁桥挠度研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.
- [6] 刘本永, 严爱国, 李世伟, 等. 高速铁路无砟轨道大跨斜拉桥成桥预拱度设置方法[J]. 铁道学报, 2023, 45(10): 156-161.
- [7] 李冰. 预应力混凝土挂篮悬臂浇筑施工技术研究[J]. 科学技术创新, 2024(8): 172-175.
- [8] 郭晓光, 安平和平, 黄叙钦, 等. 悬臂施工连续梁桥施工预拱度影响因素分析及曲线拟合[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 1-4, 21.
- [9] 吴洋. 公路桥梁预应力现浇箱梁挂篮悬臂施工技术[J]. 交通世界, 2024(增刊2): 212-214.
- [10] 苏玲, 王永平. 混凝土T梁有效预应力与预拱度之间的联系与影响[J]. 北方交通, 2017(9): 19-22.
- [11] 王连广, 崔景峰, 裴家兴. 徐变效应下曲线组合梁界面滑移与轴向力解析法计算[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(1): 1-9.
- [12] 管聪聪, 秦志川, 王建春, 等. 考虑混凝土收缩徐变的超高层施工模拟[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊2): 1846-1853.
- [13] 崔秀琴, 冯仲仁, 黄毅, 等. 混凝土箱梁桥温度效应计算与分析[J]. 混凝土, 2010(8): 31-34.
- [14] 陈权, 王丽娟, 张元海, 等. 连续箱梁的日照温差应力计算研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(8): 15-18.
- [15] 张利, 唐先鹏, 王春生, 等. 基于长期性能的混凝土大跨桥梁施工技术研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(1): 4-9.