

# 大跨度预应力混凝土连续梁桥徐变效应分析

贾毅<sup>1,2</sup>, 韦朝宽<sup>1,2</sup>, 辜光磊<sup>1</sup>, 柳其钱<sup>1,2</sup>, 黄子秋<sup>1,2</sup>

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省抗震工程技术研究中心, 云南 昆明 650500)

**摘要** 目的 对大跨度预应力混凝土连续梁桥的徐变效应展开研究,以预测自然环境中变化温湿度情况下混凝土的徐变效应。方法 依托香格里拉金沙江礼仁大桥为工程背景,结合桥址的环境特征及桥梁设计上的特点,采用 Madis/Civil 有限元计算软件建立该桥的模型,选取《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)对混凝土收缩徐变的计算模式作为标准,对变化温度、湿度条件下混凝土的收缩徐变计算模型进行改进,利用改进的计算模型对该桥进行施工控制。结果 通过对比有限元模型计算的挠度、内力及应力理论计算值与现场实测值的结果分析,在桥梁最大悬臂梁施工阶段以及成桥阶段,桥梁挠度理论计算值与实测值数值相近,总体满足工程精度要求;在成桥后,混凝土收缩徐变对预应力混凝土构件轴力影响较小,但对结构弯矩影响较大。结论 合龙后桥梁线形满足设计要求,验证了改进模型的准确性,为自然环境中大跨度 PC 连续梁桥徐变效应的分析提供了参考。

**关键词** 预应力混凝土连续梁桥;环境温湿度;混凝土收缩徐变;有限元计算;变形控制

中图分类号 U445.4

文献标志码 A

## Creep Effect Analysis of Long Span Prestressed Concrete Continuous Beam Bridge

JIA Yi<sup>1,2</sup>, WEI Chaokuan<sup>1,2</sup>, GU Guanglei<sup>1</sup>, LIU Qiqian<sup>1,2</sup>, HUANG Ziqiu<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, China, 650500; 2. Yunnan Earthquake Engineering Research Institute, Kunming, China, 650500)

**Abstract:** The creep effect of long-span prestressed concrete continuous girder bridge is studied to predict the creep effect of concrete under the condition of changing temperature and humidity in natural environment. Based on the engineering background of Liren Bridge on Jinsha River in Shangri-La, combined with the environmental characteristics of the bridge site and the characteristics of bridge design, the model of the bridge is established by using Madis/Civil finite element calculation software. The calculation model of concrete shrinkage and creep in China's 'Code for Design of Highway Reinforced Concrete and Prestressed Concrete Bridges and Culverts'

收稿日期:2022-11-22

基金项目:国家自然科学基金项目(52068037);云南省自然科学基金项目(140520210091);云南省博士后科研基金项目(109820210012);省级人培项目(241120200027)

作者简介:贾毅(1988—),男,博士,主要从事桥梁检测与承载能力评定等方面研究。

(JTG 3362—2018) is selected as the standard. The calculation model of shrinkage and creep of concrete under changing temperature and humidity conditions is improved, and the improved calculation model is used to control the construction of the bridge. By comparing the deflection, internal force and stress calculated by the finite element model with the measured values in the field, the results are analyzed. In the construction stage and the completion stage of the maximum cantilever beam of the bridge, the theoretical calculation value of the bridge deflection is similar to the measured value, which generally meets the engineering accuracy requirements. After the completion of the bridge, the shrinkage and creep of concrete have little effect on the axial force of prestressed concrete members, but have a great influence on the bending moment of the structure. The alignment of the bridge after closure meets the design requirements, which verifies the accuracy of the improved model and provides a reference for the analysis of creep effect of long-span PC continuous beam bridge in natural environment.

**Key words:** prestressed concrete continuous beam bridge; environmental temperature and humidity; concrete creep shrinkage; finite element calculation; deformation control

混凝土结构在使用过程中会因干燥引起体积的收缩,并且在长期荷载作用下会产生连续变形,这类现象被称为混凝土的收缩徐变<sup>[1]</sup>。在预应力混凝土连续梁桥中,收缩徐变不仅会造成主梁的下挠,引起结构的开裂,还将引起结构内部的应力重分布,进而造成构件预应力的损失,可见收缩徐变会给预应力桥梁带来不利影响<sup>[2]</sup>。在自然条件下,收缩徐变效应对桥梁的影响就更加难以控制,如何精准预测在温度、湿度变化的情况下桥梁结构混凝土收缩徐变效应的发展,最大限度地减少由收缩徐变引起的影响,保证工程施工的顺利进行在桥梁施工控制中显得至关重要。

Z. P. Bazant<sup>[3]</sup>收集了全球大跨度桥梁由于混凝土徐变导致主梁过度下挠的大量案例,对该类问题进行了分析,提出了符合工程实际且有较高计算精度的收缩徐变计算模型。K. W. Nasser 等<sup>[4]</sup>认为环境中相对温度和湿度是影响混凝土徐变发展的两大因素,环境温度的升高会促进混凝土中的水分蒸发,导致混凝土徐变明显加快;在一定的相对湿度条件下,混凝土中水分的蒸发率降低,徐变量也随之减小。杨永清<sup>[5]</sup>根据已有的徐变计算模型,考虑温度、湿度变化的影响,建立了适用于自然环境的收缩徐变理论模型。

卢志芳等<sup>[6]</sup>建立了温度-湿度关系曲线,将其与已有的模型相结合,成功地应用于港珠澳大桥的徐变效应分析计算中。

尽管专家学者对桥梁结构混凝土的收缩徐变进行了大量研究,但在自然环境条件下大跨度预应力混凝土连续梁桥(简称PC连续梁桥)中,对混凝土的收缩徐变研究却少有文献提及,故对该类桥型混凝土的收缩徐变效应研究是有必要的。笔者依托香格里拉金沙江礼仁大桥,建立了该桥的有限元模型,基于施工过程对桥梁结构反应的系统观测,研究处于自然环境中桥梁结构在混凝土收缩徐变作用下的响应;基于已有混凝土收缩徐变计算模型,拟提出适用于自然环境中,变化温湿度情况下的混凝土收缩徐变改进计算方法,以期对相似桥梁工程的收缩徐变计算提供借鉴。

## 1 收缩徐变计算模型

### 1.1 常用计算模型

目前,应用较多的混凝土收缩徐变模型有B4模型、CEB-FIP系列模型、ACI 209R-92模型、欧洲计算模型等。其中B4模型考虑了温度的时变效应,却未能够对施工及成桥后环境变化温湿度做出准确预测。CEB-FIP1990模型<sup>[7]</sup>在CEB-FIP系列模型中广泛

使用,该模型能很好地应用于恒定的非标准温度环境(所有模型中标准温度均为 20 ℃<sup>[8]</sup>),但是对于变化温度的自然环境适用性并不强。ACI 209R-92 模型<sup>[9]</sup>没有准确考虑到自然环境下变化温度的影响,对于变化相对湿度也是以恒定年平均相对湿度的形式考虑,认为各影响因素只会对收缩徐变的最终值产生影响,这与实际情况不符。欧洲模型 EN 1992-2 针对的是混凝土桥梁,该模型对环境相对湿度的考虑是比较完整的,不仅在名义徐变系数、名义干燥收缩中考虑了相对湿度影响,还在徐变系数随时间变化的双曲幂函数中添加了相对湿度的影响系数<sup>[10]</sup>。遗憾的是由于欧洲规范在混凝土标号、结构受力等方面的规定与我国规范不同,若想把欧洲规范模型用于计算我国混凝土结构,还需要大量的试验去验证,因此该计算模型在我国工程的适用性较差。

我国现行的《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)<sup>[11]</sup>(以下简称《公路桥涵规范》)参考了 CEB-FIP 1990 模型的基本预测形式。两种模型对混凝土的收缩徐变计算基本一致,但两者在混凝土抗压强度取值存在差异,我国规范常用的是混凝土立方体抗压强度,而 CEB-FIP 模型采用的是圆柱体抗压强度,两者之间的关系为

$$f'_c = 0.8 f_{cu,k} \tag{1}$$

式中: $f'_c$  为混凝土圆柱体抗压强度值,MPa; $f_{cu,k}$  为混凝土立方体抗压强度值,MPa。

1.2 考虑温湿度变化情况下的计算模型

通过比较国内外的收缩徐变计算模式,在《公路桥涵规范》计算公式基础上,参考文献[12]中对混凝土收缩徐变计算模型中徐变系数和收缩应变优化的方法,对公路桥涵规范计算模型进行优化,基于收缩徐变满足可叠加原理的基本假设,H. M. Fahmi<sup>[13]</sup>提出一种简单的可处理变化温度影响的方法,总应变可表示为

$$C'(t,T) = 233 + C(t,T_0) + \sum^n \{C[(t-t_i),T_i] - C[(t-t_i),T_{i-1}] + 1.52 \bar{\Delta T}_i\} \tag{2}$$

式中: $C'(t,T)$  为变化温度下的徐变度。

由文献[13]中基于时移原理考虑的恒温与变温情况,式(2)可以改写成徐变系数表达式:

$$\varphi'(t,T) = \varphi(t,T_0) + \sum^n \{\varphi[(t-t_i),T_i] - \varphi[(t-t_i),T_{i-1}]\} \tag{3}$$

式中: $\varphi'(t,T)$  为变化温度下的徐变系数; $\varphi(t,T_0)$  为参考温度下  $T_0$  的徐变系数; $\varphi[(t-t_i),T_i]$  为温度  $T_i$  下加载龄期  $t_i$ 、计算龄期  $t$  时的徐变系数。

混凝土的徐变是正增长的,气温的改变只能对徐变的发展速率产生影响。显然式(3)仅适用于温升时的情况,如果气温降低,则式中的第二项将为负值。因此笔者对该方法进行改进优化,提出一种适用于环境温度、湿度变化的混凝土收缩徐变预测的方法。推导过程如下:假设某桥梁混凝土加载龄期为  $t_0$ ,计算龄期为  $t_n$ ,从加载龄期到计算龄期,环境温度共转换  $n$  次,根据微分理论,同温度的变化一样,将持荷时间分为  $n$  个时间段,且每个时间段内的温度均为定值  $T_i$ (见图 1)。

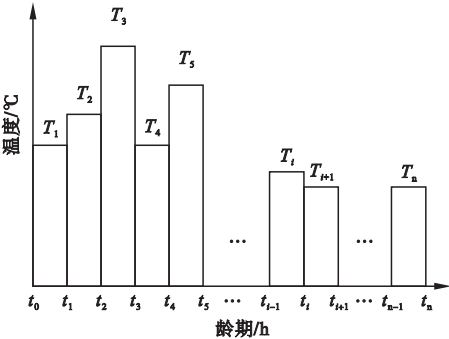


图 1 桥梁周边环境温度变化  
Fig. 1 Temperature change of the surrounding environment of the bridge

由叠加原理, $t_n$  时刻的混凝土徐变系数等于前  $n$  个时间段内徐变系数的增量和,且假设第  $i$  个时间段内的徐变系数增量仅与当前时间段的温度  $T_i$  有关。所以第  $i$  个时间段的徐变增量可表示为

$\Delta\varphi_i = \varphi[(t_i, t_0), T_i] - \varphi[(t_{i-1}, t_0), T_i]$ . (4)

式中:  $\varphi[(t_i, t_0), T_i]$  为混凝土在温度  $T_i$  下、加载龄期为  $t_0$  的徐变系数,  $\varphi[(t_i - 1, t_0), T_i]$  为计算龄期分别为  $t_i$  和  $t_i - 1$  的徐变系数。温度  $T_i$  时的徐变系数发展曲线见图 2。

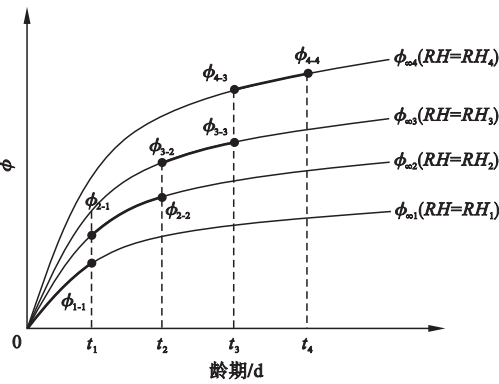


图 2 自然环境下徐变系数变化量之和

Fig. 2 Sum of changes in creep coefficients in natural environment

由图 2 可以看出,理论计算模型中的徐变系数与时间发展呈正相关,所以不论环境温度如何变化,徐变系数变化量  $\Delta\phi_i$  (各龄期差  $t_i - t_{i-1}$  内) 均为正值。因此可以得出桥梁在自然环境下的徐变系数  $\phi(t_4, t_0)$  为

$$\phi(t_4, t_0) = \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 + \Delta\phi_3 + \Delta\phi_4 = (\phi_{1-1} - 0) + (\phi_{2-2} - \phi_{2-1}) + (\phi_{3-3} - \phi_{3-2}) + (\phi_{4-4} - \phi_{4-3}). \quad (5)$$

在计算龄期  $t_n$  内,总徐变系数  $\phi(t_n, t_0)$  为

$$\phi(t_n, t_0) = \sum_{i=1}^n \Delta\phi_i = \sum_{i=1}^n \{ \phi[(t_i, t_0), T_i] - \phi[(t_{i-1}, t_0), T_i] \}. \quad (6)$$

徐变系数  $\phi(t_n, t_0)$  的发展满足随时间增长逐渐增大的规律,而且适用于不同变化因素的徐变预测。考虑环境相对湿度的影响,可以采用上述方法进行计算,自然环境下变化温湿度的影响可以综合起来考虑,  $t_n$  时刻变化温湿度影响下的徐变系数为

$$\phi(t_n, t_0) = \sum_{i=1}^n \{ \phi[(t_i, t_0), RH_i] - \phi[(t_{i-1}, t_0), RH_i] \}. \quad (7)$$

对于混凝土收缩,同样能用该方法进行计算,  $t_n$  时刻变化温湿度影响下的收缩应变为

$$\varepsilon(t_n, t_0) = \sum_{i=1}^n \left\{ \varepsilon[(t_i, t_0), RH_i] - \varepsilon[(t_{i-1}, t_0), RH_i] \right\}. \quad (8)$$

式中:  $T_i$  为各时间段内的环境温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $RH_i$  为各时间段内的环境相对湿度, %。

1.3 不同计算模型收缩徐变的比较

选取上述几种计算模型及笔者提出的模型进行比较分析,以桥梁工程所在地区 2010—2020 年的月平均温湿度作为计算条件,各模型的收缩应变计算结果见图 3,徐变变化速率曲线见图 4。

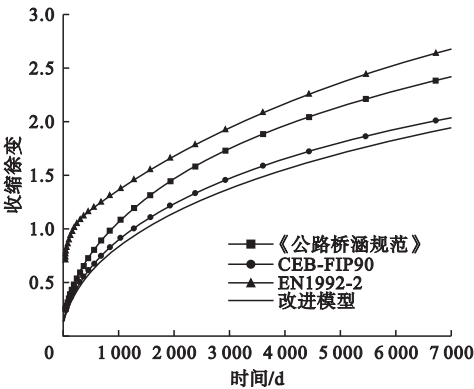


图 3 收缩应变计算结果

Fig. 3 Shrinkage strain calculation results

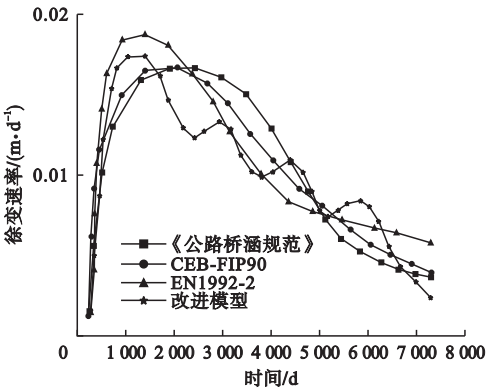


图 4 徐变变化速率曲线

Fig. 4 Creep change rate curves

从图 3 可以看出,在 CEB-FIP1990 模型、《公路桥涵规范》模型及改进模型中,收缩应

变发展规律比较接近。三种模型在初期时,其初始收缩应变差异不大,分别为 $0.15 \times 10^{-4}$ 、 $0.18 \times 10^{-4}$ 、 $0.18 \times 10^{-4}$ ,随着时间推移,三种模型的计算结果差异逐渐变大。EN 1992-2在四种模型中,初始应力最大( $0.71 \times 10^{-4}$ ),20年后的最后收缩应变值为 $2.70 \times 10^{-4}$ 。

从图4可以看出,改进模型徐变速率随着温湿度变化具有明显的浮动,呈现早期徐变速率大、中期缓慢;高温夏季时徐变速率大、冬季缓慢的特点。与笔者所提出的改进计算模型相比,其余模型由于将温湿度看作是一定值,所以徐变速率没有随环境温湿度变化浮动的特点。

通过计算结果对比分析,说明笔者提出的优化模型具有较好的适用性,能较好地反映出结构在温湿度变化的环境下的变形特征。

## 2 工程概况

### 2.1 桥梁基本信息

礼仁大桥地处滇西北高原、横断山脉西缘、长江第一湾回流带、虎跳峡附近。该桥所处地区干湿季明显,全年降雨多在5—10月

的暖季,其中7—9月是汛期,11—次年4月的寒季降雨量相对较少。主桥跨径75 m + 2 × 120 m + 75 m,桥面全宽12.5 m,截面形式采用变箱高变腹板厚的单箱单室截面,上部结构均采用C55混凝土。大桥主桥立面图见图5,典型横截面布置如图6所示,桥段划分见图7。

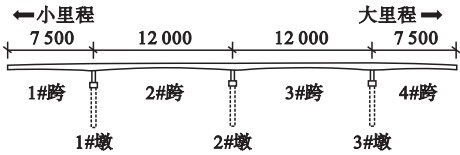


图5 大桥主桥立面图

Fig. 5 River bridge façade diagram

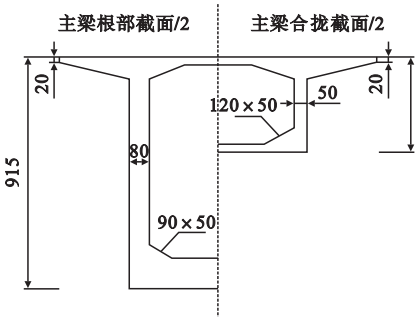


图6 大桥典型横截面图

Fig. 6 Typical cross section of bridge

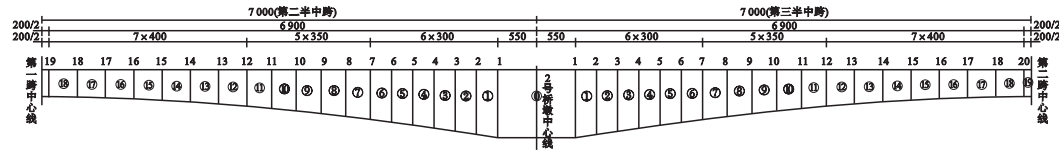


图7 大桥主梁阶段划分示意图

Fig. 7 Bridge girder stage division diagram

### 2.2 桥梁所在地区温湿度数据分析

大桥位于迪庆藏族自治州香格里拉地区,属低纬度高原季风气候。大桥上部结构的施工从2020年4月底开始,一直到2021年6月中旬跨合龙完工,历时约14个月,经历了一个完整的雨旱循环周期。桥址所在地2010—2020年的月平均相对湿度见图8,月平均降水量变化情况见图9。

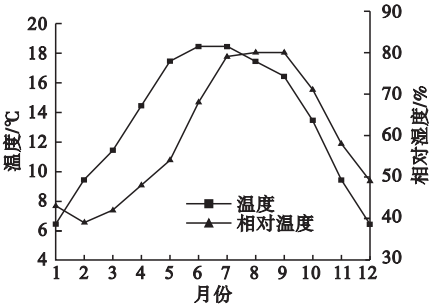


图8 桥址月平均温湿度变化曲线

Fig. 8 Monthly average temperature and humidity change curves of bridge site



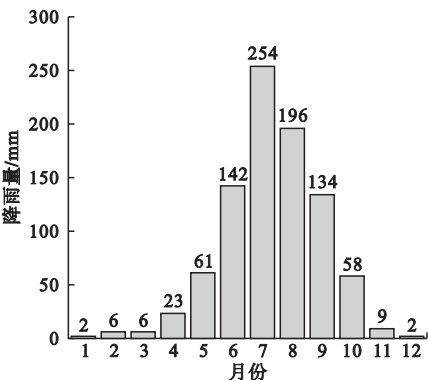


图9 桥址月均降雨量

实测值偏差较大,差值为76 mm,这是由于在施工过程中该节段的测点被破坏了,故而造成结果离散性较大。

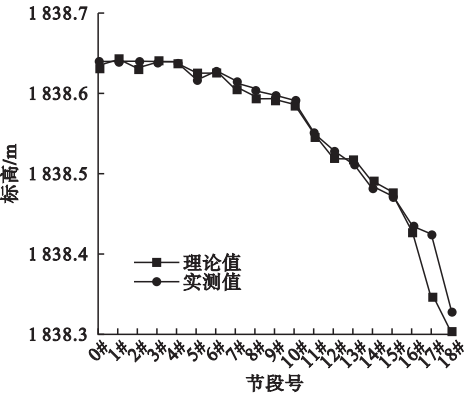


图11 2#主墩大里程节段悬臂施工阶段挠度

Fig. 11 2 # main pier large mileage section cantilever construction stage deflection

3 有限元模型计算与结果分析

3.1 桥梁计算模型

利用 Midas/Civil 有限元软件对礼仁大桥建立主桥空间梁单元模型(见图 10),根据设计施工顺序对大桥施工阶段进行划分,主桥上部结构有 130 个单元、131 个节点。在有限元模型中,采用用户自定义收缩徐变函数的方式定义时间依存性材料(徐变/收缩)函数,再将拟合后收缩徐变函数方程输入到 Midas/civil 时间依存材料(徐变/收缩)函数中,最后把收缩徐变函数赋予到大桥使用的混凝土材料中。

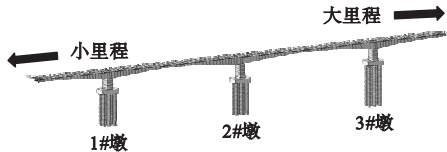


图10 礼仁大桥全桥有限元模型

Fig. 10 Finite element model of Liren Bridge

3.2 结果分析

3.2.1 挠度分析

选取 2#主墩大里程方向张拉预应力后的最大悬臂施工段以及成桥后整桥的挠度理论计算值与现场实测值对比分析,结果见图 11和图 12。

从图 11 可以看出,在最大悬臂梁施工阶段,改进模型的挠度理论计算值和实测值总体相近,偏差总体控制在  $\pm 9\text{ mm}$  以内。在个别节段,如 17#节段中挠度理论计算值与

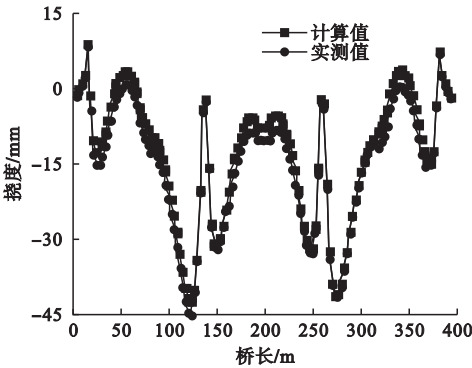


图12 成桥阶段挠度

Fig. 12 Bridge stage deflection

从图 12 可以得到,成桥阶段挠度理论计算值与实测值相比较,两者差值在  $\pm 3.03\text{ mm}$ ,桥梁合龙后桥梁线形满足设计要求。综上表明改进模型挠度理论计算结果与实际结果之间契合度高,能满足工程要求,该改进计算模型可行。

3.2.2 内力分析

对连续梁桥结构内力的研究,需要重点对受力最不利截面进行分析。预应力连续梁桥的最不利受力截面为桥跨跨中截面、桥墩墩顶控制截面。计算得到礼仁大桥 2#跨、3#跨两个跨中截面及 1#墩、2#墩、3#墩三个主墩墩顶控制截面,在初成桥阶段、成桥十年阶段的轴力及弯矩结果见表 1(表中正号代表

受拉,负号代表受压)。

由表1可知,收缩徐变对成桥后的预应力混凝土构件轴力影响较小,但对弯矩影响较大。在成桥十年的收缩徐变作用下,改进模型及公路桥涵规范计算模型的主梁截面轴力均有一定程度的降低。公路桥涵规范计算模型结果里3个主墩墩顶截面的轴力分别减小了 $3.13 \times 10^3$  kN、 $2.45 \times 10^3$  kN 和  $3.21 \times$

$10^3$  kN,两个中跨跨中截面的轴力分别减小了 $3.76 \times 10^3$  kN、 $3.87 \times 10^3$  kN。在改进模型中3个主墩墩顶截面的轴力分别减小了 $2.69 \times 10^3$  kN、 $2.07 \times 10^3$  kN 和  $2.77 \times 10^3$  kN,两个中跨跨中截面的轴力分别减小了 $3.28 \times 10^3$  kN和 $3.30 \times 10^3$  kN。在不考虑收缩徐变作用的情况下,桥墩的墩顶截面和2#跨、3#跨跨中的轴向受力基本没有影响。

表1 礼仁大桥各计算截面轴力及弯矩结果

Table 1 Results of axial force and bending moment of each calculated section of Liren Bridge							
截面	阶段	轴力/ $10^3$ kN			弯矩/ $10^3$ (kN·m)		
		考虑收缩徐变 (公路桥涵规范模型)	考虑收缩徐变(改进模型)	不考虑收缩徐变	考虑收缩徐变 (公路桥涵规范模型)	考虑收缩徐变(改进模型)	不考虑收缩徐变
1#墩顶	初成桥	-37.28	-40.33	-68.94	14.23	15.68	43.66
	成桥十年	-34.15	-37.64	-68.94	9.66	11.91	43.66
2#墩顶	初成桥	-38.85	-41.94	-70.95	-39.50	-37.95	-6.49
	成桥十年	-36.40	-39.87	-70.95	-55.75	-53.88	-6.49
3#墩顶	初成桥	-38.38	-41.45	-70.37	16.32	17.63	2.55
	成桥十年	-35.17	-38.68	-70.37	11.40	13.73	2.55
2#跨跨中	初成桥	-67.96	-68.21	-70.42	6.60	6.25	2.91
	成桥十年	-64.20	-64.93	-70.42	11.85	10.81	2.91
3#跨跨中	初成桥	-68.13	-68.38	-70.56	6.27	5.93	46.53
	成桥十年	-64.36	-65.08	-70.56	11.50	10.46	46.53

3.2.3 应力分析

应力监测采用振弦式应变计,测试结果包括温度、收缩徐变和预应力损失等各种影响因素引起的总应变。由胡可定律可得出实际的应力值,计算如下:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon.$$
 (9)

式中: $\varepsilon$  为应变; $E$  为混凝土的弹性模量,MPa。

礼仁大桥的上部结构应力监测共有4个断面,大桥主梁关于2#主墩基本对称,因此选用2#主墩大里程方向上的3#跨 A-A 截面、B-B 截面、C-C 截面和中跨合龙截面 D-D 截面实测值进行对比分析。大桥应力测试截面见图13,箱梁横截面应力传感器位置安装见图14,应力测试截面的应力计算值和测量结果见图15~图18。

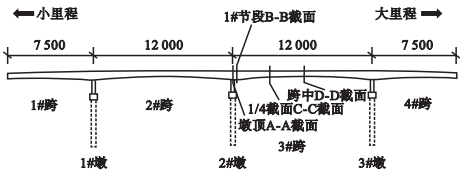


图13 应力测试截面布置图

Fig. 13 Stress test section layout diagram

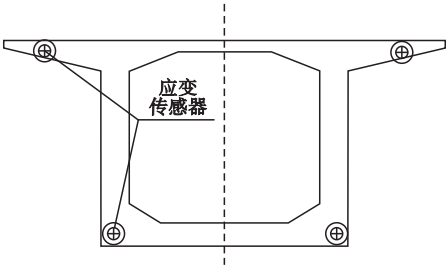


图14 应力传感器布置图

Fig. 14 Stress sensor lay-out sheet

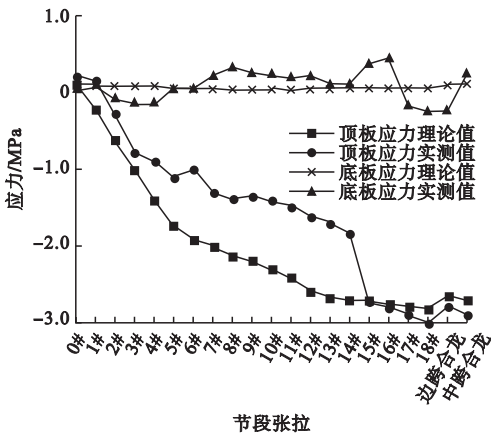


图 15 0#梁节段 A-A 截面主梁应力

Fig. 15 0# beam section A-A section main beam stress

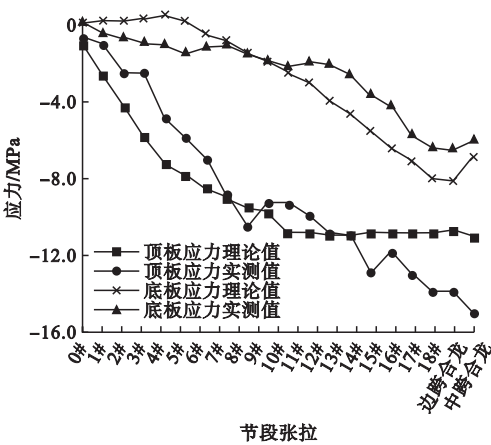


图 16 1#梁节段 B-B 截面主梁应力

Fig. 16 1# beam section B-B section main beam stress

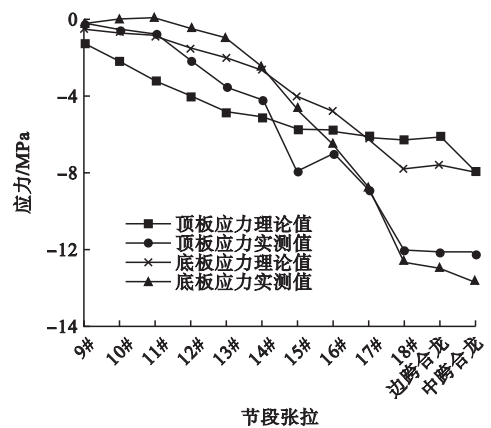


图 17 1/4 跨 C-C 截面主梁应力

Fig. 17 Stresses of 1/4 span C-C section main girder

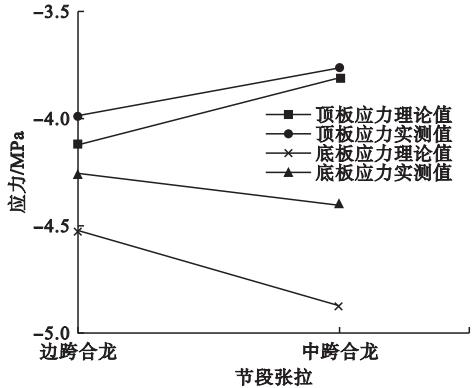


图 18 中跨合拢 D-D 截面主梁应力

Fig. 18 Middle span closure D-D section girder stress

从图 15 可以得出,主墩墩顶 0#块 A-A 截面的顶板应力理论值是随着悬臂施工的进行而呈现递增趋势。A-A 截面顶板最大压应力出现在 18#梁节段预应力筋张拉后,为  $-2.87\text{ MPa}$ 。最大拉应力出现在 0#梁节段预应力筋张拉后,为  $0.0779\text{ MPa}$ 。截面底板实测的最大压应力出现在 18#梁节段预应力筋张拉后,为  $-0.2455\text{ MPa}$ 。最大拉应力出现在 16#梁节段张拉后,为  $0.355\text{ MPa}$ 。

从图 16 可以得出,主墩墩顶截面的应力大小随悬臂施工的进行呈现递增趋势。在 3#跨合龙预应力张拉结束后,应力值发生剧变,应力曲线出现了拐点。B-B 截面顶板最大压应力出现在 3#跨合拢张拉后,为  $-15.0\text{ MPa}$ ,所有施工阶段皆未出现拉应力。截面底板最大压应力出现在边跨合拢张拉后,为  $-6.5\text{ MPa}$ ,最大拉应力为  $0.18\text{ MPa}$ 。

从图 17 可以得出,C-C 截面顶板最大压应力出现在中跨合拢张拉后,为  $-12.4\text{ MPa}$ ,未出现拉应力。截面底板的最大应力出现在中跨合龙张拉后,为  $-13.5\text{ MPa}$ ,最大拉应力为  $0.4\text{ MPa}$ 。

图 18 中,由于现场检测时间的限制,3#跨合龙时 D-D 截面只进行了一次数据采集。比较理论应力值与实测应力值可以得到,顶板及底板的实测值均小于理论值,顶板实测最大应力值为  $-3.976\text{ MPa}$ ,底板实测最大应力值



为-4.402 MPa。D-D 截面顶板和底板应力的理论及实测应力均为压应力。综上分析结果可知,所测的应力值均满足规范要求。

### 4 结 论

(1)分析不同的混凝土收缩徐变计算模型结果表明,在自然环境条件下不同计算模型结果差异十分显著,故考虑变化温湿度的影响对于准确预测大跨度 PC 连续梁桥的徐变效应是极其必要的。

(2)收缩徐变对桥梁结构轴力的作用影响可以忽略不计,对弯矩和应力的影响十分明显。收缩徐变效应可导致桥墩墩顶区域弯矩下降,桥跨跨中区域的弯矩增加。

(3)笔者基于现有规范中混凝土的收缩徐变计算模型提出了改进模型,该模型在计算变化温湿度环境下混凝土收缩徐变效应有较好的工程适应性。

### 参考文献

[1] 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. (WANG Lianguang,CUI Jingfeng,PEI Jiaxing. Analysis method of creep on interface slip and force of curved steel-concrete composite [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2022,38(1):1-9.)

[2] 王永宝,原元,赵成功,等.混凝土结构徐变模型试验与原型对比关系[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2020,36(3):465-473. (WANG Yongbao,YUAN Yuan,ZHAO Chenggong, et al. Comparative relationship between model test and prototype in creep behavior of concrete constructure [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2020,36(3):465-473.)

[3] BAŽANT Z P, MIJA H H, QIANG Yu. Pervasiveness of excessive segmental bridge deflections: wake-up call for creep [J]. ACI structural journal,2011,108(6):766.

[4] NASSER K W, NEVILLE A M. Creep of concrete at elevated temperatures [J]. ACI structural journal,1965,62(12):1567-1680.

[5] 杨永清,鲁薇薇,李晓斌,等.自然环境混凝土徐变试验和预测模型研究[J].西南交通大学学报,2015,50(6):977-983.

(YANG Yongqing, LU Weiwei, LI Xiaobin, et al. Experimental study and prediction model of concrete creep in ambient environment [J]. Journal of southwest jiaotong university,2015,50(6):977-983.)

[6] 卢志芳,刘沐宇,李倩.考虑温度和湿度变化的钢-混组合连续梁桥徐变效应分析[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(7):2650-2657. (LU Zhifang,LIU Muyu,LI Qian. Creep effect analysis of steel-concrete composite bridge considering mutative temperature and relative humidity [J]. Journal of central south university (science and technology),2015,46(7):2650-2657.)

[7] Comité Euro-International Du Béton. CEB-FIP model code 1990; BS EN 1992—1—1: 2004 [S]. Lausanne; Thomas Telford,1993.

[8] 王永宝.自然环境条件下大跨度劲性骨架混凝土拱桥长期变形行为研究[D].成都:西南交通大学,2017. (WANG Yongbao. Study on long-term behavior of long-span concrete arch bridge with stiffed concrete filled steel tube in natural environment [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2017.)

[9] ACI Committee 209. Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures; ACI209 R—92 [S]. Detroit: American Concrete Institute,1992.

[10] Technical Committee CEN TC 250 “Structural Eurocodes”. Eurocode 2; Design of concrete structures—part 2: concrete bridges—design and detailing rules,IS EN 1992—2:2005 [S]. Dublin: National Standards Authority of Ireland,2005.

[11] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范; JTG 3362—2018 [S]. 北京:人民交通出版社,2018. (CCCC Highway Consultants Co. Ltd. Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts; JTG 3362—2018 [S]. Beijing: China Communication Press,2018.)

[12] 汪剑.大跨预应力混凝土箱梁桥非荷载效应及预应力损失研究[D].长沙:湖南大学,2006. (WANG Jian. Prediction of thermal effects, shrinkage and creep effects, and prestress losses in long-span pc box girder bridge [D]. Changsha: Hu’nan University,2006.)

[13] HANI M F, BORIS B, MILOS P. Prediction of creep of concrete at variable temperatures [J]. Journal proceedings,1973,70(10):709-716. (责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)