

基于温度修正徐变模型的公路大跨连续刚构桥 结构状态影响分析

杨战勇

(中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 211899)

摘要:现行公路桥规中未考虑自然环境温度变化对徐变系数的影响,由此可能导致理论计算结果与桥梁实际状态存在较大差异。基于此,该文以规范徐变模型为基础,引入了一种能够考虑环境温度变化的混凝土组合徐变公式,通过数学函数拟合既有温度历史数据预测环境温度随时间变化历程,提出了一种考虑温度修正项的改进型规范徐变公式。以一座主跨为182 m的公路大跨预应力混凝土连续刚构桥为背景,建立徐变模型计算桥梁施工及运营典型阶段的主梁挠度及应力状态,并与规范模型进行对比。结果表明:环境温度变化对徐变系数有较大影响,因桥址地区常年气温较高,温度修正后的徐变系数终值大于规范值;环境温度变化对主梁挠度有较大影响,考虑温度修正项后主梁挠度极大值较规范模型值增长显著,其中跨中挠度最大增幅达到67.1%,建议在进行主梁挠度分析时计入环境变温效应;两种徐变模型下主梁应力随梁长变化趋势一致,应力极大值差异小。

关键词:温度修正;徐变模型;连续刚构桥;挠度;应力

1 前言

徐变是大跨预应力混凝土桥梁结构长期性能降低的主要因素之一,作为混凝土材料的固有属性,对徐变进行准确预测显得尤为重要。近几十年来国内外诸多

学者对徐变机理开展了广泛的研究工作,基于大量试验在考虑多种影响因素的基础上发展了一系列半经验半理论的徐变计算模型,主要包括CEB—FIP、ACI、GL 2000、B3~B4s、AASHTO、JTG 3362—2018和TB 10002—2017等系列模型。由于混凝土材料特性、试验条件等方面的诸多差异,使得通过特定试验得到

- *****
- [3] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].
- [4] 丁鹏,周建庭,杨俊,等. UHPC套箍加固拱桥承载力研究[J]. 中外公路,2019(4).
- [5] YU Yuling, YIN Shipin, NA Mingwang. Bending Performance of TRC—Strengthened RC Beams with Secondary Load under Chloride Erosion[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(1):196—206.
- [6] 常柱刚,蒋友宝,曾宙希. 基于M—N关系图的RC偏压构件强度设计方法[J]. 铁道科学与工程学报,2017(12).
- [7] Porras R, Carmona J R, Yu R C, et al. Experimental Study on the Fracture of Lightly Reinforced Concrete Elements Subjected to Eccentric Compression[J]. Materials and Structures, 2016, 49(1):1—14.
- [8] Rodrigues E A, Manzoli O L, Bitencourt L A G, et al. Failure Behavior Modeling of Slender Reinforced Concrete Columns Subjected to Eccentric Load[J]. Latin American Journal of Solids & Structures, 2014, 12(3): 520—541.
- [9] Matamb C M, DU X L, ZHANG J W. Research on Compression Failure and Size Effect in High Strength Eccentric Reinforced Concrete Column[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 193(8): 656—661.
- [10] CHEN W S, PHAM T M, SICHEMBE H, et al. Experimental Study of Flexural Behaviour of RC Beams Strengthened by Longitudinal and U—Shaped Basalt FRP Sheet[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 134: 114—126.
- [11] 刘金升,钱永久. 外套钢管加固偏心受压钢筋混凝土短柱承载力计算[J]. 中外公路,2016(4).
- [12] 曹伟,吴合良,贺耀北. 车撞作用下桥墩非线性损伤及加固措施研究[J]. 中外公路,2017(4).

的徐变预测模型难以通用。王永宝等和汪建群等的研究工作较好地反映了这个问题,他们分别对目前主流的徐变预测模型进行了对比分析,前者认为修正的 B3 模型能够较好地适用于中国的收缩徐变计算,后者认为对于高强混凝土 JTG 3362—2018 和 GL 2000 模型则更为合适。

影响徐变的因素较多,可分为内部和外部因素,前者主要与混凝土的材料和制备工艺有关,后者主要与外部环境如加载龄期、计算龄期、温湿度等有关。将各主要因素以参数的形式作用在徐变系数的计算式中,实现了其对徐变影响的量化考量。不同系列的徐变模型所计入的影响参数存在差异,徐变理论基础亦不尽相同,这直接导致了徐变模型难以具有普适性。虽然普适性较难达到,但针对特定徐变模型,通过引入可能对结果产生较大影响的参数,修正计算公式,提高预测的准确性使之与实际情况更为相符,具有重要的工程实践意义。卢智芳,刘沐宇等将构建的桥梁实际环境的温度和相对湿度变化函数嵌入到 CEB—FIP 90 徐变模型中,建立了考虑混凝土桥梁实际工作环境的温湿度变化徐变模型,并验证了考虑温湿度变化对徐变计算的必要性;杨永清,鲁薇薇等提出了一种预测实际环境温、湿度条件下混凝土徐变的组合徐变模型,忽略环境相对湿度变化,在仅考虑环境变温前提下将该组合模型分别应用于一座公路和铁路预应力混凝土梁桥的结构分析中,主梁应力和线形的较大差异印证了桥梁徐变模型计入环境温度变化的必要性。

目前考虑环境变温效应的徐变模型在公路大跨预应力混凝土连续刚构桥的应用较少,且因各地气候的不同导致环境温度变化差异显著,因此针对特定气候区域的桥梁开展基于温度修正徐变模型的桥梁结构行为研究对该地区桥梁设计、施工及后期运营维护具有较大的指导意义。基于此,该文以广东某高速公路的一座大跨预应力混凝土连续刚构桥为背景,从数值分析的角度开展理论分析工作。

2 基于温度修正的徐变模型

现阶段中国公路桥梁领域所采用的徐变模型是基于 CEB—FIP90 徐变模型在恒温恒湿条件下的变化式,该模型随着 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(简称 04 桥规)的颁布开始应用于公路桥梁设计中,2018 年颁布了 JTG

3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(简称 18 规范),但徐变计算模型依旧沿用 04 桥规的至今。近 10 多年的应用说明该模型基本符合中国的国情,因此笔者认为以规范模型为基础开展考虑环境变温效应的温度修正徐变模型研究具有较好的实践意义也便于推广应用。18 规范所建议的徐变系数计算表达式为:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \quad (1)$$

$$\phi_0 = \left(1 + \frac{1 - RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^{\frac{1}{3}}}\right) \cdot \frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}} \cdot \frac{1}{0.1 + (t_0/t_1)^{0.2}} \quad (2)$$

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1}\right]^{0.3} \quad (3)$$

$$\beta_H = 150 \left[1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_0}\right)^{18}\right] \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 \quad (4)$$

式中: $\phi(t, t_0)$ 为加载龄期为 t_0 时的混凝土徐变系数; t_0 和 t 分别为加载龄期和计算考虑时刻的混凝土龄期; ϕ_0 为名义徐变系数; β_c 为加载后徐变发展系数,各参数具体意义详见规范。在该模型中依照年平均相对湿度取值计入了环境湿度变化对徐变系数的影响,虽然不够精确,但已有研究成果表明:实际环境相对湿度与计算时所采用的年平均相对湿度的差异对徐变结果影响较小,由此忽略环境相对湿度变化仅对变温效应进行修正是可行的。对规范模型进行温度修正可借鉴文献[8]的组合徐变公式,其表达式为:

$$\phi(t, t_0, \Delta Y_{RH}, \Delta \theta) = \phi(t, t_0, Y_{RH}, \theta_0) + \phi(t, \Delta Y_{RH}, \theta_0) + \phi(t, \Delta \theta) \quad (5)$$

式中: $\phi(t, t_0, \Delta Y_{RH}, \Delta \theta)$ 为基准徐变系数; $\phi(t, \Delta Y_{RH}, \theta_0)$ 为湿度徐变系数; $\phi(t, \Delta \theta)$ 为温度徐变系数。

将公式(1)代入公式(5)中作为基准徐变系数,并忽略湿度徐变系数项,可得到基于温度修正的规范徐变模型计算式:

$$\phi(t, t_0, \Delta T) = \phi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) + \phi(t, \Delta T) \quad (6)$$

式中: ΔT 为环境实际温度与标准温度 20°C 的差值, $\phi(t, \Delta T)$ 为考虑环境变温效应的徐变系数修正项,其表达式为:

$$\phi(t, \Delta T) = \frac{\beta_T \sum_{i=1}^{n-1} \left[\Delta T_i \sum_{j=i+1}^n \Delta t_j \right]}{\sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i} \quad (7)$$

式中: $\beta_T = 0.04$, ΔT_i 和 $\sum_{j=i+1}^n \Delta t_j$ 分别为第 i 个环境温度与标准温度的温差(可正可负, 正值为升温, 负值为降温)和该温差作用持续时间, $\sum_{i=1}^{n-1} \Delta t_i$ 为各温度差作用持续时间总和, 时间按天计。

式(7)是基于叠加原理得到的, 温差及对应的持续时间均为统计量需依据桥址所在地区的气象资料数据计算得到, 一般情况下大跨度公路梁桥的建设周期为1~2年, 运营期所考虑的收缩徐变时长为10年, 若考虑的环境变温效应持续时间愈长则统计工作量大且繁琐, 甚至有可能需要编制专门的计算机程序来实现, 不便于工程运用。事实上徐变模型本质为预测模型, 在进行桥梁设计或施工监控前期理论计算时, 桥梁建设及运营阶段的气温数据是未知量, 为应用式(6)需首先预测环境温度。对于该问题文献[7]提供了一种思路, 即预先统计桥址当地气温历史数据, 而后采用多项式拟合的方式得到温度随时间的变化函数, 该拟合函数表达式为:

$$T(t') = a_0 + a_1 t' + a_2 t'^2 + a_3 t'^3 + a_4 t'^4 \quad (8)$$

式中: $a_0 \sim a_4$ 为温度拟合系数, 可通过适宜的拟合算法得到, 对此该文采用非线性最小二乘法予以分析; t' 为计算龄期 t (t 可大于 365 d) 到计算龄期当年 1 月 1 日的时间(d), 其值为 1~365 d。为使温度拟合函数具有代表性, 气温历史数据应统计足够的年份且具有一定时效性, 建议取桥梁建设前桥址地区 3~5 年的数据作为拟合对象分析。式(8)中的 t' 与混凝土计算龄期 t 非同一参数, 因此式(8)不能直接代入式(7), 需做一定转换:

$$t' = \text{mod}[(t + t_2), 365] \quad (9)$$

式中: t_2 为混凝土浇筑日期距浇筑当年 1 月 1 日的天数, mod 为求余数公式, 特殊情况当上式求余结果为 0 时, $t' = 365$ d。

由此通过式(9)确立了计算龄期 t 与温度拟合函数自变量 t' 的关系式, 将式(8)代入式(7)得到预测环境温度变化的徐变系数修正项:

$$\phi(t, \Delta T) = \frac{\beta_T \sum_{i=t_0+1}^t \{a_0 + a_1 t' + a_2 t'^2 + a_3 t'^3 + a_4 t'^4 - 20\}}{t - t_0} \quad (10)$$

式中: t' 需用式(9)确定的关系式替换, 限于篇幅不予赘述。

3 项目概况及有限元模型的建立

3.1 桥梁概况

某高速公路特大桥主桥为预应力混凝土连续刚构桥, 跨径组合为(106+182+106) m, 大桥全长 394 m。主梁采用 C60 混凝土, 采用挂篮悬臂浇筑法施工, 沿纵向划分有 2 个墩顶 0# 梁段、88 个悬臂浇筑梁段、2 个边跨支架现浇段、2 个边跨合龙段和 1 个中跨合龙段。其半幅桥面宽 19.85 m, 单箱双室断面, 其中箱梁底宽 12.85 m, 两侧悬臂翼缘板宽 3.5 m, 箱梁根部梁体中心线梁高 $H_{\text{根}} = 11$ m, 跨中及端头梁中心线梁高 $H_{\text{中}} = 3.8$ m, 箱梁梁高采用 1.6 次抛物线变化, 主梁为三向预应力体系, 纵向预应力束采用 $\phi^s 15.2$ 标准强度 $f_{pk} = 1860$ MPa 的高强度低松弛钢绞线, 纵向钢束均为两端张拉。桥梁主墩为矩形实体墩, 尺寸为横向 \times 纵向 = 1 285 cm \times 180 cm, 采用 C50 混凝土, 桥梁荷载等级为公路—I 级。该桥跨中及墩顶位置截面如图 1 所示。

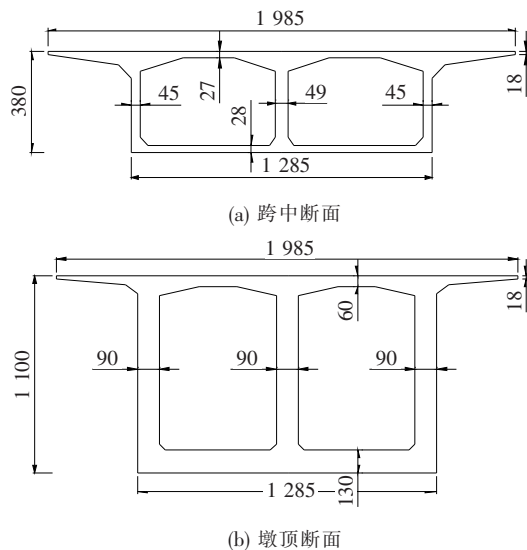


图 1 箱梁主要断面尺寸图(单位:cm)

3.2 桥址处气象信息统计及分析

该桥地处广东省东莞市境内, 根据当地政府发布的年度气象统计资料, 该地 2014—2018 年间的年平均相对湿度变化范围为 74%~82%, 其中 2016 年因降雨天数和降雨量均较大导致年均相对湿度达到 82%, 其余各年份湿度为 74%~78%; 5 年间的年平均气温为 22.8~23.5 °C。年度气象统计资料显示除特殊年份外, 当地年均气温和相对湿度变化量较小, 整体较为稳定, 采用拟合公式对日均气温拟合是可行的。图 2

为天气网统计的 2014—2018 年 5 年日均气温数据所绘制的日均气温变化历程曲线。

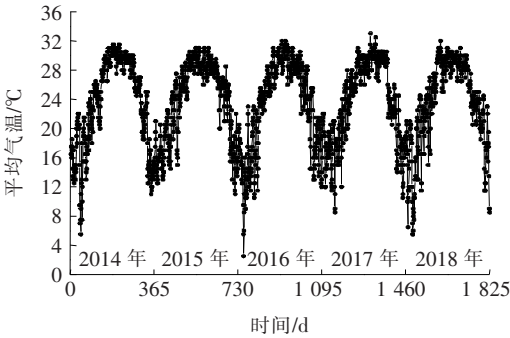


图 2 东莞地区 2014~2018 年日均气温变化历程曲线

由图 2 可知:每年年底和年初即冬季气温较低,年中即夏季气温较高,此外每年年初受冷空气影响,气温随时间历程变化规律受到一定影响,出现极端天气的情况具有一定随机性,由于为短期效应,因此在拟合时可对该部分异常数据予以剔除。综合分析后可取 2014 年的气温数据作为拟合对象,基于非线性最小二乘拟合得到的温度随时间的变化曲线见图 3,该拟合曲线同样可反映其他年份日均气温的变化趋势,因此可作为温度预测模型应用于徐变系数计算中。

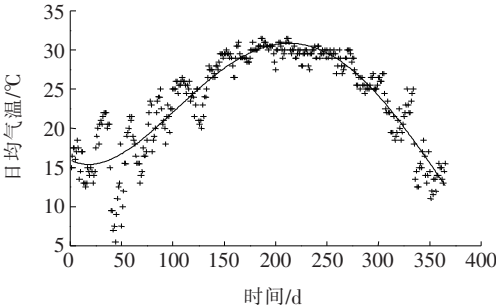


图 3 基于非线性最小二乘拟合得到的温度随时间的变化曲线

3.3 桥梁有限元模型

根据该桥的受力特点,经合理简化后在桥梁专业软件 Midas Civil 中采用空间梁单元建立了该桥空间杆系有限元模型,如图 4 所示。模型依照设计施工图对主梁及墩柱进行合理的划分,共有节点总数 162 个,梁单元总数 147 个,并根据桥梁实际边界条件合理约束桥梁节点,基于温度修正的徐变模型通过自定义徐变系数的方式应用至计算中。该桥采用挂篮悬浇法施工,按照施工工序共划分为 113 个施工阶段,为较真实地反映施工期的环境温度变化,各施工阶段的时间历程按照桥梁节段实际的施工日期模拟,其中各梁段混凝土的加载龄期按 5 d 计。

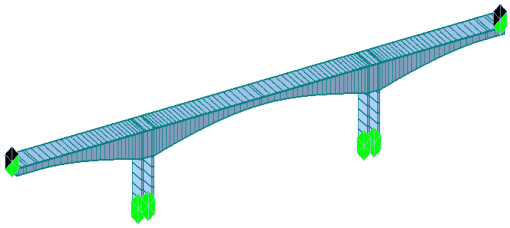


图 4 成桥状态下桥梁有限元模型

4 徐变模型对结构状态影响的数值分析

4.1 徐变系数对比分析

为对比混凝土主梁节段在不同季节浇筑及不同环境温度变化历程的混凝土徐变系数发展情况,图 5 分别给出了主梁 6# 块、14# 块和 22# 块的规范徐变系数和温度修正后徐变系数随时间历程变化曲线图。3 个典型节段分别代表了环境温度最高的夏季、环境温度

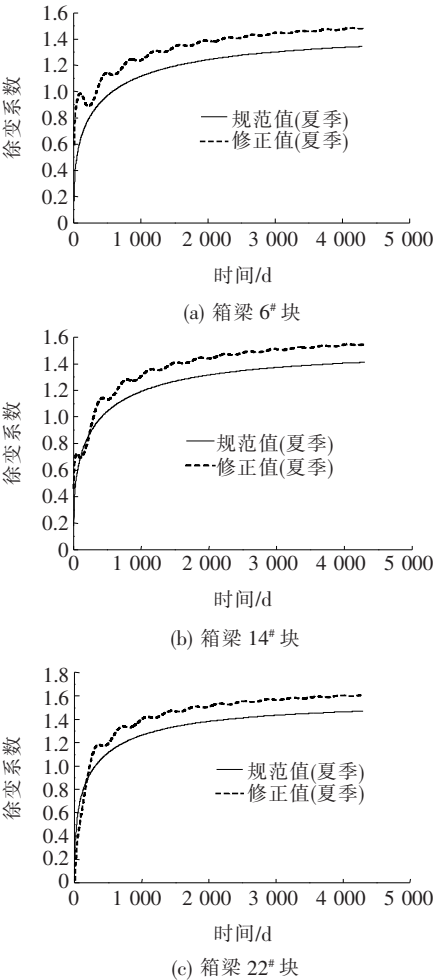


图 5 不同季节浇筑的混凝土箱梁节段徐变系数随时间历程变化对比

最低的冬季以及介于两者气温之间的秋季施工的情形,由于春季施工的主梁节段所处的环境温度及对应的温度变化历程与秋季的较为接近,限于篇幅文中未对春季施工进行对比。

由图5可知:

(1) 在环境气温周期性变化影响下,温度修正后的徐变系数随时间历程变化曲线呈波浪形,并随着时间的延长波浪线形趋于平滑。

(2) 不同季节施工的混凝土节段徐变系数相较于规范值呈现的规律有所不同,夏季浇筑的6[#]块因初始环境温度高徐变系数早期发展较规范值快,随后秋冬季因环境温度降低徐变系数值略有下降,但整个时间历程内修正徐变系数始终大于规范值;秋季浇筑的14[#]块因环境初始温度较夏季低且处于降温趋势中,早期徐变系数略大于规范值随后略小于规范值,在进入新的升温趋势后,修正徐变系数较规范值增长迅速,此后始终大于规范值;冬季浇筑的22[#]块仅在早期初始环境温度较低的情况下,修正徐变系数小于规范值,其后均大于规范值。

(3) 以标准温度20℃为参考,温度持续升高徐变系数增大,温度持续降低徐变系数减小,分析徐变系数的温度修正项[公式(10)]可得到一致的结论。

(4) 两种模型的徐变系数随时间历程的变化趋势整体一致,徐变系数早期增长较快,后期增长缓慢,两条曲线在后期近乎平行,由于东莞地区常年温度较标准温度高,6[#]块、14[#]块和22[#]的徐变终值较规范值分别增大了10.1%、9.53%和9.53%,修正后的徐变系数终值大于规范终值。

4.2 徐变模型对主梁线形的影响分析

为对比徐变模型对主梁线形的影响,图6给出了应用规范和修正徐变模型计算得到的主梁在桥面铺装和10年徐变完成后的主梁竖向累计挠度图,其中主梁由第1年4月上旬开始0[#]块施工到第2年5月中旬实现全桥合龙,历时约13个月,修正徐变模型中每个混凝土节段的温度变化历程依据前文2.2节的温度随时间变化拟合曲线得到。由图(6)可知:① 桥面铺装及10年徐变完成后,两种徐变模型得到的桥梁累计挠度线形基本一致,均为双“W形”,但挠度极大值存在差异;② 桥面铺装完成后,基于规范徐变模型得到的边、主跨箱梁挠度最大值分别为-27.3、-28.8 mm,基于修正徐变模型得到的边、主跨箱梁挠度最大值分别为-44.0、-46.2 mm,考虑环境变温效应后边、主跨箱梁最大挠度增幅明显,分别较规范模型增大了

61.0%和60.7%,表明环境变温效应对于桥梁变形存在较大影响,考虑环境温度影响后主梁挠度极大值有较大幅度的增长;③ 10年徐变完成后,基于规范徐变模型得到的边、主跨箱梁挠度最大值较桥面铺装完成后状态略有增大,其值分别为-30.6、-32.0 mm,基于修正徐变模型边跨挠度最大值略有减小,其值为-41.7 mm,主跨挠度最大值略有增大,其值为-48.1 mm,考虑环境变温效应后边、主跨箱梁最大挠度较规范模型分别增大了36.2%和50.0%,表明10年徐变完成后两种模型的主梁线形差异虽略有缩小但增幅仍然较大,基于规范模型设置桥梁预拱度势必造成了主梁挠度最大值的低估,亦会导致桥梁在后期运营中的跨中下挠;④ 结合前文徐变系数分析结果,考虑环境温度变化后徐变系数的增大最终导致了结构变形的增大,因此对于年均气温高于20℃的桥址地区需计入温度变化对徐变变形的影响。

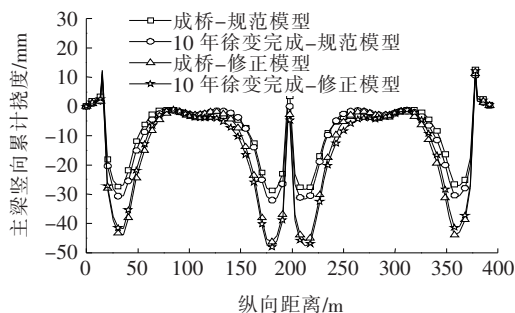


图6 成桥及10年徐变完成后不同徐变模型的主梁竖向累计挠度

4.3 徐变模型对主梁应力的影响分析

因桥梁主梁为对称结构,以主跨中点为对称中心图7给出了基于规范及修正徐变模型在桥面铺装及10年徐变完成后半桥主梁的顶、底板应力随梁长分布图。

由图7可知:① 桥面铺装和10年徐变完成工况下,基于规范和修正徐变模型得到的半桥主梁顶、底板应力分布均匀、沿梁长度方向变化趋势一致。② 基于规范徐变模型,桥面铺装完成后箱梁梁顶应力为-2.58~-14.5 MPa,梁底应力为-3.62~-12.7 MPa,10年徐变完成后箱梁梁顶应力为-2.55~-13.5 MPa,梁底应力为-3.58~-11.7 MPa;基于徐变模型,桥面铺装完成后箱梁梁顶应力为-2.58~-14.3 MPa,梁底应力为-3.62~-13.3 MPa,10年徐变完成后箱梁梁顶应力为-2.55~-13.5 MPa,梁底应力为-3.57~-11.3 MPa。相同施工工况基于不同徐变模型得到的顶、底板应力极值差异差为0.28%~4.7%,

表明两种徐变模型得到的主梁顶、底板应力差异较小,基于温度修正的徐变模型对主梁的应力影响较小。

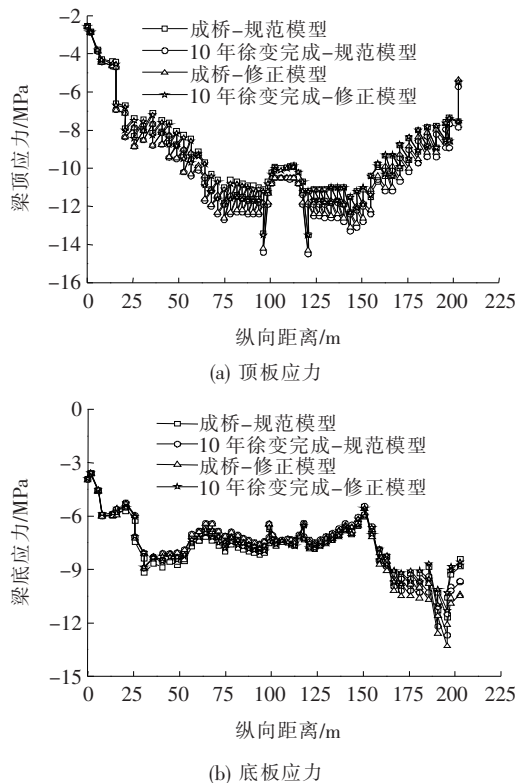


图7 成桥及10年徐变完成后不同徐变模型的主梁顶、底板应力随梁长分布

5 结论

以现行公路桥梁18规范和组合徐变模型为基础,经统计和分析环境温度变化的历史资料,采用非线性最小二乘法拟合得到了预测环境温度随时间变化的函数,并依此函数对规范徐变公式进行了改进。通过实例数值对比分析得到如下主要结论:

(1) 环境温度变化对混凝土徐变系数有较大影响,因气温随季节周期性变化,徐变系数呈波浪形振荡,不同季节浇筑的混凝土节段徐变系数随时间历程发展的变化规律存在一定差异,总体而言受桥址地区常年气温较高影响,考虑温度修正后的徐变系数终值大于规范值。

(2) 考虑环境变温效应对桥梁成桥及运营线形有较大影响,基于温度修正徐变模型得到的成桥及运营阶段的主梁挠度最大值较规范值增幅显著,建议设置

桥梁施工预拱度时,应考虑环境的变温效应,避免对桥梁挠度的低估,同时亦反映出徐变变形是桥梁变形的主要影响因素。

(3) 考虑环境的变温效应对桥梁主梁的应力影响总体较小,两种徐变模型下相同施工阶段的主梁顶、底板应力随梁长的变化趋势相同,应力极值差异小。

(4) 该文在18桥规基础上所建立的考虑环境温度变化的徐变模型物理概念清晰,通过拟合环境温度变化函数,对于预测桥梁结构状态的长期变化适用性良好。

参考文献:

- [1] 吕志涛,潘钻峰.大跨径预应力混凝土箱梁桥设计中的几个问题[J].土木工程学报,2010(1).
- [2] 王永宝,贾毅,廖平,等.混凝土收缩徐变预测模型对比分析[J].铁道建筑,2017(8).
- [3] 汪建群,吕鹏,许巧,等.混凝土徐变计算模型及其实用性评述[J].工程力学,2018(s2).
- [4] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [5] TB 10092—2017 铁路桥涵混凝土结构设计规范[S].
- [6] 卢志芳,刘沐宇.徐变参数随机性对预应力混凝土梁桥长期变形的影响分析[J].武汉理工大学学报,2013(7).
- [7] 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(7).
- [8] 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(6).
- [9] 鲁薇薇,杨永清,李晓斌.随机变温作用下徐变对预应力混凝土梁桥结构行为的影响[J].公路交通科技,2017(12).
- [10] 鲁薇薇.自然环境温度作用下徐变对预应力混凝土桥梁挠度影响研究[J].铁道标准设计,2018(9).
- [11] Comit E Euro-Tnternational Du B Eton. CEB-FIP Model Code 1990: Design Code[S]. London: Thomas Telford Ltd., 1993.
- [12] JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [13] Sakata K, Ayano T. Effect of Ambient Temperature and Humidity on Creep and Shrinkage of Concrete[C]. Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage Structural Design Effects. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2000: 215—235.