

环境温湿度对钢筋混凝土主拱圈应力重分布的影响研究

张潭潭, 吴子儒, 罗沐鑫

(广东省建科建筑设计院有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 针对现有规范中的不足, 对比研究了变化温湿度收缩徐变模型和《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中的恒定温湿度收缩徐变模型下主拱圈截面应力重分布, 建立空间实体单元模型与梁单元模型, 并研究了普通钢筋对主拱圈截面应力重分布的影响。结果表明: 变化温湿度模型结果更加精确。随着收缩徐变的进行, 主拱圈截面上、下缘应力逐渐减小, 当考虑普通钢筋时, 截面应力进一步减小, 考虑普通钢筋时主拱圈截面应力最大下降 7.6%, 表明普通钢筋对截面应力重分布有显著影响。从多尺度的角度对比梁单元模型和实体单元模型应力的空间分布, 由于宽桥空间效应更加明显, 普通的梁单元模型已经不能满足验算的精度要求, 所以宽桥应采取梁格模型甚至实体单元分析来保证结果的精度。

关键词: 钢筋混凝土拱桥; 变化温湿度模型; 收缩徐变; 应力重分布

中图分类号: U442

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)10-0110-05

0 引言

钢筋混凝土拱桥在使用期间会因周围环境的影响产生体积收缩, 以及在荷载作用下产生连续的变形。这种体积收缩和连续变形称为收缩徐变效应^[1], 而混凝土的收缩徐变将导致主拱圈截面应力重新分布。混凝土收缩徐变的影响因素众多, 最主要的因素包括环境的温湿度和普通钢筋的约束效应。由于自然环境复杂, 收缩徐变效应难以预测, 如何准确模拟收缩徐变的发展, 以降低收缩徐变对桥梁的影响, 保证桥梁施工和运营阶段的安全性, 在桥梁设计中显得至关重要。

为了研究钢筋混凝土拱桥主拱圈截面应力重分布的影响因素, 国内外学者进行了大量的研究。刘掌红^[2]为探究 C60 低收缩低徐变, 开展收缩徐变试验, 基于试验数据拟合公式, 并对比规范, 运用有限元分析, 得出使用该混凝土比普通 C60 混凝土能有效地减小挠度失效概率。崔冰等^[3]以规范中的收缩徐变曲线为基础, 通过修正得到北江大桥专用收缩徐变曲线。结果表明, 修正后的模型结果更加接近实际情况。Fernando L ó pez Gayarre 和 Hakas Prayuda 等^[4-5]

研究了不同骨料和膨胀性能下混凝土结构的长期变形、应变等, 并结合试验和有限元分析, 结果表明使用有限元可以准确地预测混凝土的收缩徐变效应。

上述研究大多考虑的是恒定温湿度模型, 而桥梁使用期间温湿度并非恒定不变, 现有的规范和研究所采取的收缩徐变模型存在一定的不足。本研究以此为出发点, 通过实体仿真分析, 考虑变化温湿度模型函数, 并在此基础上研究考虑普通钢筋约束效应下桥梁结构的应力重分布。

1 收缩徐变应力重分布理论

1.1 收缩徐变理论

混凝土的收缩为混凝土体内所含水分的变化、化学反应和温度降低等物理化学因素引起其本身体积缩小的现象。它是不依赖于荷载, 而与时间有关的一种变形。

混凝土结构或者材料在长期恒定荷载作用下, 变形随时间增长的现象称为徐变。混凝土的徐变特性主要与时间参数有关, 通常表现为前期增长较快, 而后逐渐变缓, 经过 2~5 a 后趋于稳定。徐变变形会比结构的瞬时弹性变形大 1~3 倍, 在某些不利的情况下可能会更大。所以, 在混凝土结构设计计算时, 徐变是一个不可忽略的影响因素^[6-7]。

收稿日期: 2023-07-17

作者简介: 张潭潭(1993—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事市政路桥、隧道设计与研究工作。

1.2 收缩徐变次内力

一般情况下,静定结构收缩徐变只会产生变形,不会产生次内力。徐变变形等于弹性变形乘以徐变系数。超静定结构徐变变形等于一次落架的弹性变形值乘以徐变系数。徐变变形只与结构形式有关,与施工过程无关。

根据上述分析可知,钢筋混凝土拱桥通常采用无铰拱,结构为超静定结构,收缩徐变将产生次内力,由于收缩徐变是时变效应,进而引起主拱圈截面应力重分布。由于普通钢筋的存在,截面应力重分布将更加明显。

2 混凝土徐变的影响因素

2.1 恒定温湿度收缩徐变模型

环境温度对混凝土徐变有显著的影响。相关试验^[8]表明:温度在 21~71 ℃时,徐变速率随温度的升高而增大。当温度在 71~96 ℃时,徐变速率反而随温度的升高而降低。

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[9]关于收缩徐变的计算,可近似地适用于 -20~+40 ℃季节性变化的混凝土。如要更精确地考虑,所有表列数值只适用于平均温度在 10~20 ℃的混凝土;否则,应按下列方法对大约 0~80 ℃的范围、对混凝土平均温度 20 ℃的实际偏差的影响进行修正。按下列公式对名义收缩系数、收缩发展系数、名义徐变系数和徐变发展系数进行修正。

(1)名义收缩系数

$$\beta_{RH,T} = \beta_{RH} \beta_{sT}$$
$$\beta_{sT} = 1 + \left(\frac{8}{103 - 100 RH / RH_0} \right) \left(\frac{T / T_0 - 20}{40} \right)$$

(2)收缩发展系数

$$\alpha_{sT}(T) = 350 (h / h_0)^2 \cdot e^{-0.06 (T / T_0 - 20)}$$

(3)名义徐变系数

$$\varphi_{RH,T} = \varphi_T + (\varphi_{RH} - 1) \cdot \varphi_T^{1.2}$$
$$\varphi_T = e^{0.015 (T / T_0 - 20)}$$

(4)徐变发展系数

$$\beta_{H,T} = \beta_H \beta_T$$
$$\beta_T = e^{[1\ 500 / (273 + T / T_0) - 5.12]}$$

公式中相关参数详见《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》,这里不再赘述。

2.2 变化温湿度收缩徐变模型

由于桥梁在使用期间温度和湿度并非恒定不

变,而 2.1 节规范所提供的收缩徐变模型仅适用于恒定温湿度。基于规范中的不足,本节基于汪剑^[10]提出的可考虑变化温湿度收缩徐变模型,收缩应变和徐变系数计算公式如下。

$$\varepsilon(t_n, t_0) = \sum_{i=1}^n \{ \varepsilon[(t_i, t_s), T_i, RH_i] - \varepsilon[(t_{i-1}, t_s), T_i, RH_i] \}$$
$$\varphi(t_n, t_0) = \sum_{i=1}^n \{ \varphi[(t_i, t_0), T_i, RH_i] - \varphi[(t_{i-1}, t_0), T_i, RH_i] \}$$

公式中相关参数详见《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》。

3 实例分析

3.1 工程概况

工程实例为南水河桥梁。该桥位于韶关市龙归镇,跨越南水河,河涌宽度约为 56 m,河道管理范围控制线宽度约为 87.4 m。桥梁采用上承式板拱桥,主拱圈矢跨比为 1/8,跨径组合为 1-56 m。桥宽 24 m,主拱圈宽 24 m,厚 1.0 m。主拱圈的线形采用二次抛物线,桥型布置如图 1 所示。截面纵向钢筋均采用 $\phi 28$ 的 HRB400 钢筋,箍筋采用 $\phi 16$ 的 HRB400 钢筋,截面钢筋布置如图 2 所示。

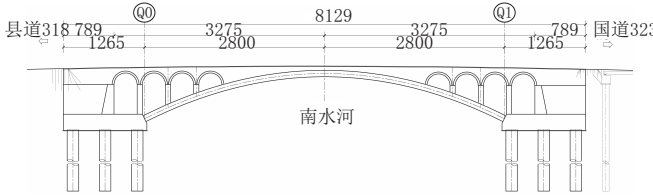


图 1 桥型布置(单位:cm)

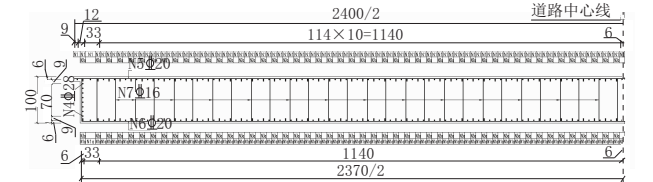


图 2 主拱圈截面钢筋布置(单位:cm)

3.2 桥址温湿度确定

韶关市武江区龙归镇属亚热带季风气候区,但又具有复杂多变的山区气候特点。多年平均气温为 20.1 ℃;常年最冷的月份是 1 月,平均气温 9.6 ℃;常年最热的月份是 7 月,平均气温 28.9 ℃,极端最高气温 39.5 ℃(1967 年 7 月 27 日)。12 月至次年 3 月为冬季,其中 12 月至次年 1 月为低温霜冻期,最冷 1 月份平均气温 9.6 ℃,极端最低气温 -5.3 ℃(1963 年 1 月 15 日)。多年平均降雨量 1 640 mm,年最大降雨量 2 303.7 mm(1961 年),降水的年内分布以 12 月份最少;最多的月份为 4—6 月。为研究不同环境条

件对钢筋混凝土拱桥收缩徐变的影响,选取桥址 10 a 月平均温湿度(见图 3、图 4)。

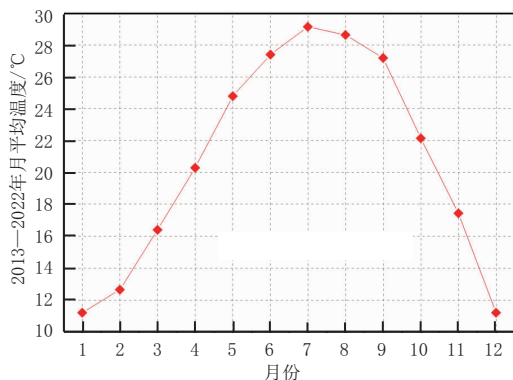


图 3 韶关 2013—2022 年月平均温度

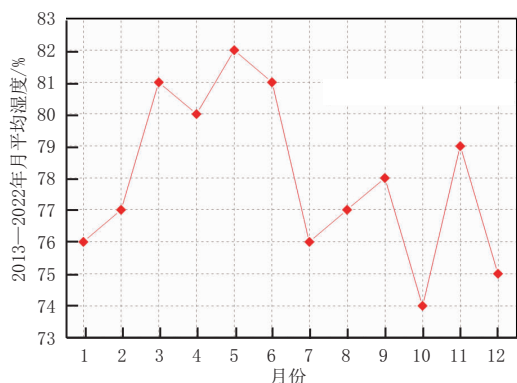


图 4 韶关 2013—2022 年月平均湿度

3.3 收缩应变和徐变系数计算

研究成桥后 10 a 内主拱圈截面的应力重分布,根据 2 节公式计算考虑变化温湿度后收缩应变和徐变系数,并对比规范中的恒温湿度的收缩应变和徐变系数。收缩应变和徐变系数随时间变化曲线如图 5、图 6 所示。

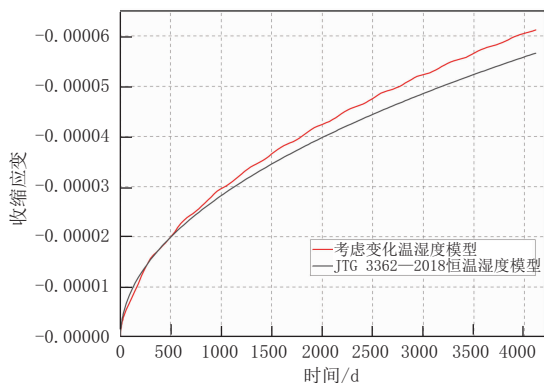


图 5 收缩应变曲线

根据图 5、图 6 可知,规范中考虑的恒定温湿度模型,收缩应变和徐变系数曲线较为平滑,而考虑变化温湿度模型曲线表现为一定波动性。导致曲线发生波动的根本原因为:温度高、湿度低的时候,曲线增长较快,温度低、湿度高的时候,曲线增长较慢,但

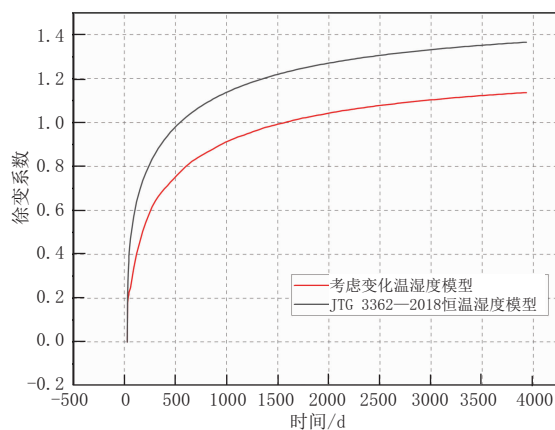


图 6 徐变系数曲线

整体呈递增趋势。

3.4 不同因素下主拱圈应力重分布分析

本节主要研究变化温湿度模型和恒温湿度模型下,考虑普通钢筋和不考虑普通钢筋主拱圈截面应力重分布情况,共计 4 种工况,并利用实体仿真软件 MIDAS FEA 建立 4 种仿真模型,研究 10 a 时间内主拱圈截面应力重分布情况,并设置截面应力点。应力点位、有限元模型如图 7、图 8 所示。

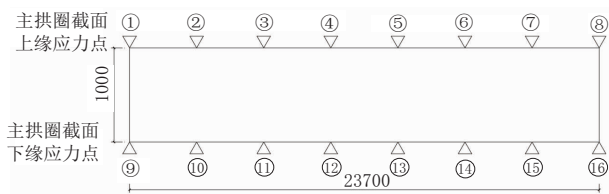


图 7 主拱圈截面应力点位(单位:mm)

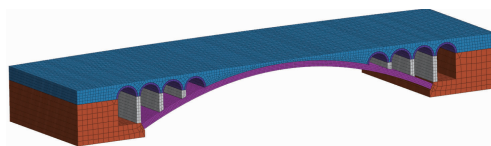


图 8 实体有限元模型

3.4.1 变化温湿度模型

本节依据变化温湿度模型,研究考虑普通钢筋和不考虑普通钢筋主拱圈应力重分布情况。由于篇幅限制,结果仅展示跨中截面上缘和拱脚截面下缘 10 a 时间的应力重分布情况。有限元计算如图 9 至图 11 所示。

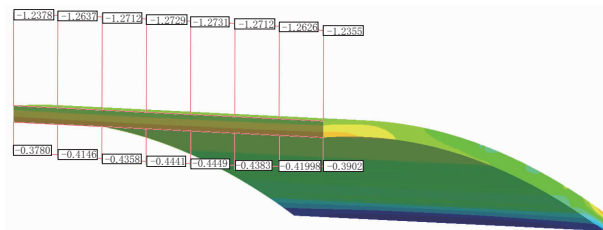


图 9 变化温湿度模型考虑普通钢筋中间值(压应力)

根据计算可知,随着时间的发展,考虑钢筋和不考虑钢筋,截面应力变化趋势相同。拱顶截面上下缘

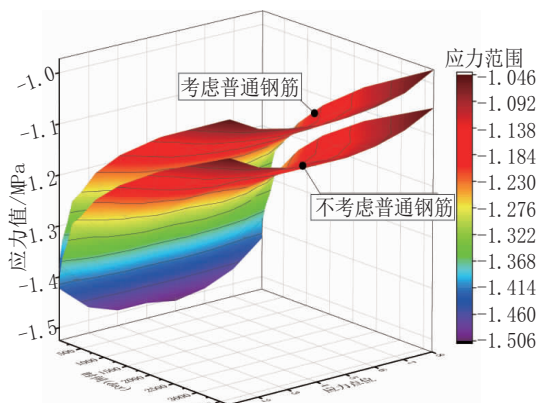


图10 跨中截面上缘应力重分布对比(压应力)

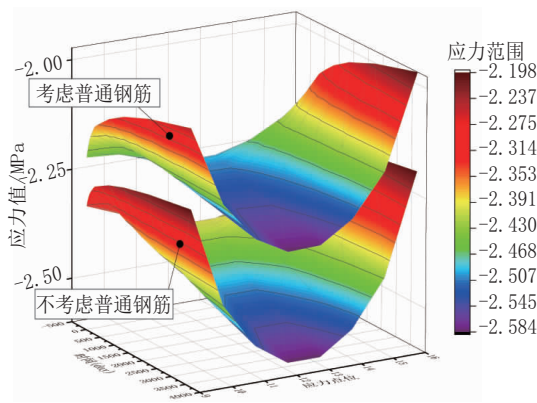


图11 拱脚截面下缘应力重分布对比(压应力)

1~16号点处的应力随着收缩徐变呈逐渐减小的趋势。拱脚截面上缘1~8、9、16号点处的应力随着收缩徐变呈逐渐减小的趋势,10~15号点处的应力随着收缩徐变呈逐渐增大的趋势。不考虑钢筋情况下,拱顶截面应力随着收缩徐变的发展,压应力逐渐减小,应力由1.716 MPa减小至0.387 MPa,最大减小1.33 MPa,位于12、13点位;拱脚截面压应力由1.653 MPa减小至0.967 MPa,最大减小0.66 MPa,部分点位应力增大,但增加量较小,可忽略不计。考虑钢筋的情况下,拱顶截面应力随着收缩徐变的发展,压应力逐渐减小,应力由1.588 MPa减小至0.288 MPa,最大减小1.30 MPa,位于12、13点位;拱脚截面压应力由1.55 MPa减小至0.75 MPa,最大减小0.80 MPa,部分点应力增大,但增加量较小,可忽略不计。当考虑普通钢筋后,混凝土截面上下缘应力呈下降趋势,拱顶截面上缘应力减少最大点位于1、8号,应力由1.047 MPa减小至0.972 MPa,下降7.16%;下缘应力减少最大点位于9、16点,应力由0.324 MPa减小至0.221 MPa,下降31.79%。拱脚截面上缘应力减少最大点位于1、8号点,应力由0.967 MPa减小至0.748 MPa,下降22.65%;下缘应力减少最大点位于16点,应力由2.198 MPa减小至1.973 MPa,下降10.24%。

3.4.2 恒定温湿度模型

本节依据恒定温湿度模型,研究考虑普通钢筋和不考虑普通钢筋主拱圈应力重分布情况。由于篇幅限制,结果仅展示跨中截面上缘和拱脚截面下缘10 a时间的应力重分布情况。有限元计算如图12至图14所示。

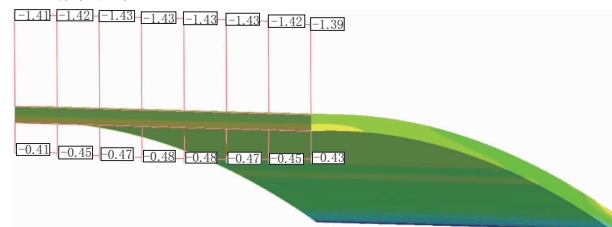


图12 恒定温湿度模型考虑普通钢筋中间值(压应力)

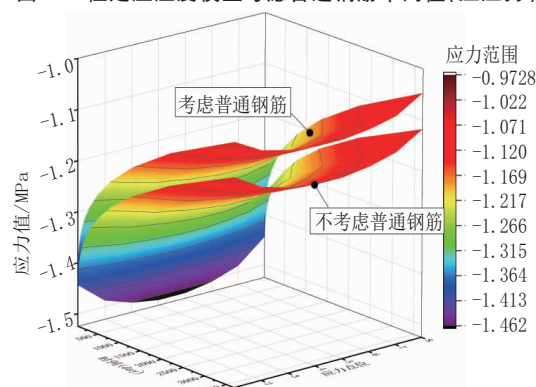


图13 跨中截面上缘应力重分布对比(压应力)

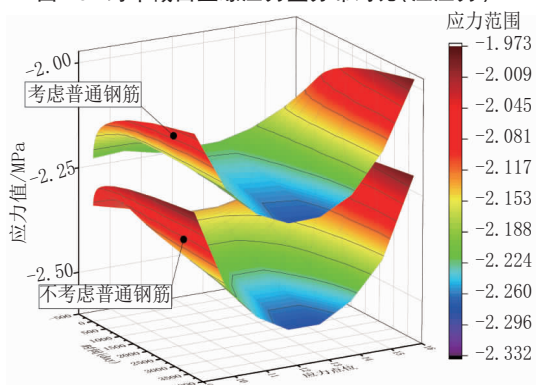


图14 拱脚截面下缘应力重分布对比(压应力)

根据计算可知,当采用恒定温湿度模型时,截面应力变化趋势与变化温湿度模型基本一致。不考虑钢筋情况下,拱顶截面应力随着收缩徐变的发展,压应力逐渐减小,应力由1.686 MPa减小至0.541 MPa,最大减小1.14 MPa,位于12、13点;拱脚截面压应力由1.638 MPa减小至1.084 MPa,最大减小0.55 MPa,部分点位应力增大,但增加量较小,可忽略不计。考虑钢筋情况下,拱顶截面应力随着收缩徐变的发展,压应力逐渐减小,应力由1.627 MPa减小至0.601 MPa,最大减小1.026 MPa,位于12、13点;拱脚截面压应力由1.55 MPa减小至0.864 MPa,最大减小0.68 MPa,部分点位应力增大,但增加量较小,可忽略不计。当

考虑普通钢筋后,混凝土截面上下缘应力呈下降趋势,拱顶截面上缘应力减少最大点位于1、8号,应力由1.117 MPa减小至1.046 MPa,下降6.36%;下缘应力减少最大点位于9、16点,应力由0.54 MPa减小至0.49 MPa,下降9.26%。拱脚截面上缘应力减少最大点位于1、8号,应力由1.084 MPa减小至0.809 MPa,下降25.37%;下缘应力减少最大点位于16点,应力由2.212 MPa减小至1.984 MPa,下降10.31%。

4 多尺度模型结果对比

为了研究桥梁结构的空效应,本节对比梁单元模型与实体单元模型结果的差异性,结果仅展示主拱圈跨中截面上下缘应力结果。模型及结果如图15、图16所示。

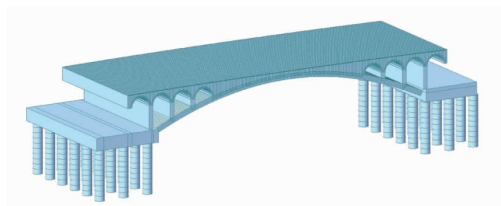


图15 梁单元模型

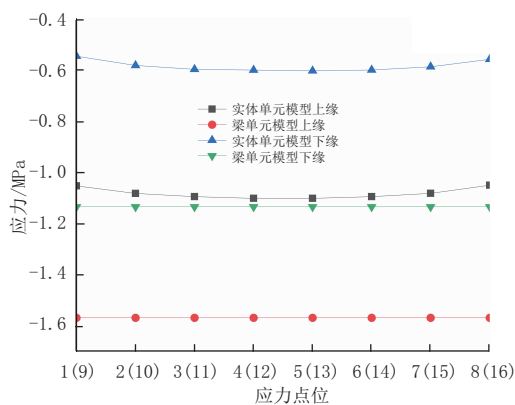


图16 跨中截面应力结果对比(10 a 收缩徐变)

本项目桥梁宽度较大,以及荷载的横向分布作用,导致应力横向分布不均匀,本节对比分析考虑普通钢筋恒定温湿度模型下,梁单元和实体单元差异。由图16可知,实体单元拱顶截面上缘横向应力由4号点1.099 MPa变化至8号点1.047 MPa,最大差异4.73%;下缘横向应力由12号点0.599 MPa变化至16号点0.557 MPa,最大差异7.01%。从梁单元模型

计算结果可以看出应力横向无差异,桥梁较宽时,梁单元模型并不能真实反映桥梁的空间效应。

5 结 语

本文主要研究不同环境条件下钢筋混凝土拱桥主拱圈应力重分布特点,考虑变化温湿度及普通钢筋对主拱圈应力重分布的影响,主要得到以下结论:

(1)对比研究了变化温湿度模型和恒定温湿度模型,结果表明两种截面应力重分布结果相差较大,桥梁前期设计中应按照变化温湿度考虑收缩徐变,结果更加准确。

(2)随着10 a收缩徐变的进行,主拱圈截面应力呈现重新分布的特点,主拱圈截面上、下缘应力逐渐减小。当考虑普通钢筋后,截面应力进一步减小。

(3)由于本项目桥梁宽度较大,空间效应更加明显,普通的梁单元模型结果误差较大,所以宽桥应采取梁格模型甚至实体单元分析来保证结果的精度。

参考文献:

- [1] 张运涛,孟少平.基于响应面法的大跨连续刚构桥长期变形预测[J].土木工程学报,2011,44(8):102-106.
- [2] 刘掌红.基于收缩徐变试验的大跨径PC连续刚构桥长期挠度可靠度分析[J].北方交通,2022(8):9-12.
- [3] 崔冰,周尚猛,王岩.大跨度连续刚构桥精细化专用收缩徐变模型及其实际桥应用研究[J].公路,2022,67(9):146-152.
- [4] Fernando López Gayarre, Jesús Suárez González, Carlos López-Colina Pérez, et al. Shrinkage and creep in structural concrete with recycled brick aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2019(20):116750.1-116750.11.
- [5] Hakas Prayuda, Ganchai Tanapornraweekit, Somnuk Tangterm-sirikul, et al. Field investigation and finite element analysis on expansion and shrinkage strains of expansive[J]. concrete structures, 2022,360(12):95-98.
- [6] 贾毅,韦朝宽,辜光磊,等.大跨度预应力混凝土连续梁桥徐变效应分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(3):456-464.
- [7] 王玉鹏,肖祖海.澳门与内地规范混凝土收缩徐变对构件挠度计算对比[J].工程建设与设计,2023(6):12-14.
- [8] 李国泮,马贞勇.混凝土的性能[M].北京:中国工业出版社,1983.
- [9] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [10] 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.