

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.06.019

引用格式: 徐玉梁, 梁承桂. 连续刚构桥箱形截面非均匀收缩自应力分析[J]. 公路与汽运, 2024, 40(6): 99-102+109.

Citation: XU Yuliang, LIANG Chenggui. Analysis of self-stress of box-section of continuous rigid frame bridge due to non-uniform shrinkage[J]. Highways & Automotive Applications, 2024, 40(6): 99-102+109.

连续刚构桥箱形截面非均匀收缩自应力分析

徐玉梁¹, 梁承桂²

(1. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014;

2. 湘西土家族苗族自治州交通建设质量安全监督站, 湖南 吉首 416000)

摘要: 在箱形截面分析计算中, 由于同一截面中存在收缩效应不均等情况, 若默认各区域混凝土收缩效应一致, 会导致理论分析计算结果与实际情况出现偏差。为探究同一截面非均匀收缩状态对其内部应力的影响, 文中从箱形截面内部湿度扩散的不均匀性出发, 推导非均匀收缩自应力计算公式, 并采用 ANSYS 软件建立简易模型对公式准确性进行验证, 分析箱形截面内部非均匀收缩自应力的变化规律。结果表明, 在非均匀收缩作用下, 自应力在箱形截面顶板和底板均会产生拉应力, 但随着截面逐渐靠近中部, 平均相对湿度逐渐增大, 非均匀收缩自应力逐渐变为压应力, 且随着时间的推移, 拉、压应力逐渐增大, 非均匀收缩效应对箱形截面整体应力的影响极大。

关键词: 桥梁; 连续刚构桥; 箱形截面; 非均匀收缩; 自应力; 湿度扩散

中图分类号: U441.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)06-0099-04

在传统收缩徐变效应分析计算、有限元模拟分析中, 建立桥梁模型时大多会默认各区域产生的混凝土收缩效应一致, 导致理论计算值与后期运营实测值出现很大差异。如下挠实测值运营前期比理论值小、后期比理论值大, 上挠实测值前期较小、后期较大; 应力出现顶部和底缘拉应力、中部压应力增加等现象。截面各部分混凝土收缩不均匀产生非均匀收缩效应是引起这类现象的主要原因之一。

有学者针对各类收缩徐变理论模型进行比较分析, 认为模型结果与环境相对湿度、构件理论厚度、混凝土加载龄期等相关^[1], 即使同一截面, 各区域也会因为这些因素造成不同的收缩徐变效应, 且收缩效应占主要地位。非均匀收缩是指同一截面不同位置产生不同收缩效应。混凝土结构自身存在干燥收缩过程, 其内部自由水会向外部扩散蒸发, 导致其发生收缩变形, 结构体积发生改变。但截面类型不同, 结构产生的收缩形式不同。对于箱形截面, 由于箱形截面各区域厚度大部分情况下不尽相同, 箱梁各部位产生的收缩速率不同, 既会产生轴向收缩变形, 也会产生挠曲变形。这种现象是由箱梁非均匀收缩引起的^[2]。对于普通混凝土构件, 长期收缩变形可分为干燥收缩和自收缩两种。自收缩是一种由于水化反应产生的固有收缩, 干燥收缩是混凝土内外湿

度平衡过程中水分转移引起体积改变而发生的收缩。在长期收缩变形中, 自收缩由于在混凝土浇筑 5~7 d 内就可完成 90% 左右, 其占比较小; 干燥收缩则由于发展周期长, 其占比较大。本文从干燥收缩的角度, 利用湿度扩散理论研究混凝土结构的非均匀收缩, 将箱形截面划分为不同区域, 根据不同区域水分蒸发的差异对非均匀收缩自应力进行公式推导和模型验证。

1 箱形截面内部混凝土湿度扩散

混凝土结构内部总会存在水化现象, 湿度会因为水化现象发生改变, 大体分为饱和阶段和下降阶段^[3-4]。在饱和阶段, 相对湿度恒定, 为 100%; 在下降阶段, 由于水化反应等, 相对湿度下降, 水分消耗主要由水化作用及干燥作用引起的混凝土内部毛细孔含水量下降所致^[5]。

采用有限元软件模拟混凝土结构内部因相对湿度产生的湿度场时, 可利用与其相似的温度场进行模拟, 相应控制参数也可互相转换, 如湿度场的扩散系数对应温度场的导温系数(传导率)、湿度场的交换系数对应温度场的放热系数、湿度场的干燥变形系数对应温度场的线膨胀系数等^[6]。由于密度和比热容不影响湿度场分析结果, 无实际意义, 将其设置

为 1。利用通用有限元分析软件 ANSYS,结合某特大桥梁中跨合龙段箱形截面的参数,采用 Plane 55 单元进行热传导,密度和比热容取 1,扩散系数 D_{sat} 按式(1)计算。

$$D_{sat} = 2.07 \times 10^{-3} / [10 / (f_{cm} - 8)] \quad (1)$$

式中: f_{cm} 为圆柱体抗压强度。

混凝土初始湿度设置为 100%,采用瞬态分析^[7]。对箱形截面内部混凝土相对湿度扩散 90 d、100 d、120 d、240 d、360 d 时的相对湿度分布进行模拟,扩散 90 d 时的相对湿度分布见图 1,扩散 90 d、100 d、120 d、240 d、360 d 时箱形截面内部相对湿度分布对比见图 2。从图 1、图 2 可以看出:由于箱形截面各部位厚度不同及与外界接触面数量不同,相对湿度扩散程度不尽相同,非均匀收缩徐变主要由顶板、底板构件理论厚度差异引起。

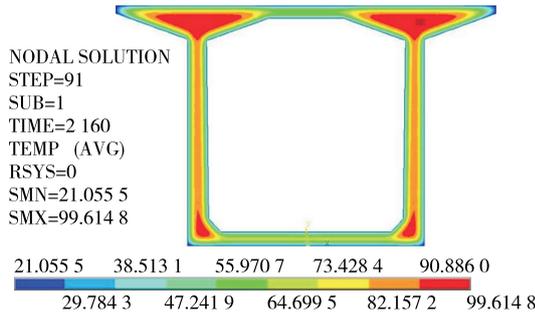


图 1 箱形截面内部混凝土相对湿度扩散 90 d 时相对湿度分布(单位:%)

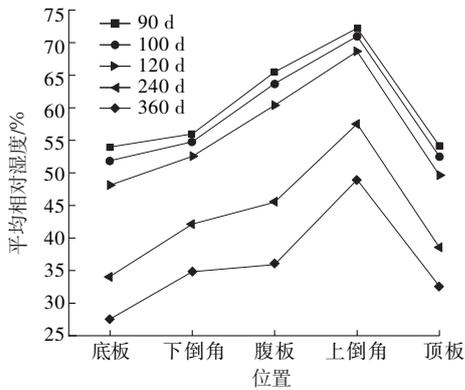
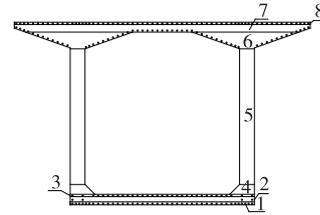


图 2 箱形截面内部混凝土相对湿度不同扩散时间时相对湿度分布

为方便计算与数据处理,建立截面时仅取受拉和压区钢筋截面,并根据截面形式将箱形截面划分为 8 个区域(见图 3)。

2 非均匀收缩自应力计算公式推导

进行混凝土自应力公式推导前,对混凝土构件



1~8 为区域编号

图 3 箱形截面分析区域示意图

作如下基本假定:1) 所用截面符合平截面基本假定;2) 相对湿度沿梁高度以非线性形式分布(见图 1);3) 忽略时间变化时混凝土弹性模量和强度的变化;4) 分析中混凝土处于线性状态。

自应力是截面中纵向纤维约束造成的一种约束力,时刻 t 下由非均匀收缩引起的自应力为:

$$\sigma_{esh}(t, t_0, y) = E_c [\epsilon_{sh}(t, t_0, y) - (\epsilon_0 + \rho y)] \quad (2)$$

式中: σ_{esh} 为自由收缩应力值; y 为截面与底部之间的距离; E_c 为混凝土弹性模量; ϵ_{sh} 为混凝土收缩应变; $\epsilon_{sh}(t, t_0, y)$ 表示由 t_0 时刻加载到 t 时刻时底部距离为 y 处混凝土的收缩应变; ϵ_0 为收缩引起的截面轴向应变; ρ 为收缩引起的截面轴向曲率。

由于在不均匀收缩效应影响下沿梁高度方向产生的应力不同,将梁沿高度方向划分为 n 层,根据平截面假定,得到整体截面的平衡条件方程如下:

$$N = \sum_{i=1}^n \sigma_{esh}(y_i) A_i + \sigma_{s1} A_{s1} + \sigma_{s2} A_{s2} \quad (3)$$

$$M = \sum_{i=1}^n \sigma_{esh}(y_i) A_i (y_i - y_c) + \sigma_{s1} A_{s1} (y_{s1} - y_c) + \sigma_{s2} A_{s2} (y_{s2} - y_c) \quad (4)$$

式中: $\sigma_{esh}(y_i)$ 为第 i 层混凝土的收缩自应力; A_i 为第 i 层面积; σ_{s1} 、 σ_{s2} 分别为受拉区、受压区钢筋应力, $\sigma_{s1} = E_{s1}(\epsilon_0 + \rho y_{s1})$, $\sigma_{s2} = E_{s2}(\epsilon_0 + \rho y_{s2})$; E_{s1} 、 E_{s2} 分别为受拉区、受压区钢筋弹性模量,由于本文采用的箱形截面受拉区、受压区所用钢筋型号相同, $E_{s1} = E_{s2}$,下文统一用 E_s 表示; y_{s1} 、 y_{s2} 分别为受拉区、受压区钢筋形心距底部的距离; A_{s1} 、 A_{s2} 分别为受拉区、受压区钢筋面积; y_c 为钢筋形心距底部的距离。

联立式(2)~(4),根据 $N=0$ 、 $M=0$,得到关于 ϵ_0 、 ρ 的联立方程组。在联立过程中,为便于计算,结合实际情况,作以下规定:1) 受拉区、受压区钢筋在截面收缩过程中为压应力,直接取负值;2) 根据换算截面法对钢筋混凝土截面进行换算,截面总面积按式(5)计算,中性轴按式(6)计算。

$$A = \sum_{i=1}^n A_i \tag{5}$$

$$y_c = \left(\sum_{i=1}^n y_i A_i \right) / A \tag{6}$$

结合以上条件,得到如下方程组:

$$\begin{cases} a\varepsilon_0 + b\rho = m \\ c\varepsilon_0 + d\rho = n \\ a = E_c A + E_s (A_{s1} + A_{s2}) \\ b = E_c \sum_{i=1}^n y_i A_i + E_s (y_{s1} A_{s1} + y_{s2} A_{s2}) \\ c = E_c \sum_{i=1}^n (y_i - y_c) A_i + E_s [A_{s1} (y_{s1} - y_c) + A_{s2} (y_{s2} - y_c)] \\ d = E_c \sum_{i=1}^n y_i (y_i - y_c) A_i + E_s [y_{s1} A_{s1} (y_{s1} - y_c) + y_{s2} A_{s2} (y_{s2} - y_c)] \\ m = E_c \sum_{i=1}^n \varepsilon_{sh}(t, t_0, y_i) A_i \\ n = E_c \sum_{i=1}^n \varepsilon_{sh}(t, t_0, y_i) A_i (y_i - y_c) \end{cases} \tag{8}$$

通过式(7)、式(8)可求得特定时刻混凝土截面非均匀收缩效应引起的收缩自应力在截面的分布。

3 箱形截面非均匀收缩自应力分析

3.1 非均匀收缩自应力公式验证

为验证上述公式的准确性,以文献[8]中矩形简支梁为例,采用 ANSYS 软件建立模型,以混凝土收缩徐变 400 d 为例,对比不同相对湿度下收缩自应力计算结果。简支梁采用 C45 混凝土,长×宽为 180 mm×120 mm,计算参数见表 1。采用相对湿度在梁高度方向的计算公式[见式(9)]进行公式计算结果与模型模拟结果对比^[9]。

表 1 矩形简支梁计算参数

参数	取值	参数	取值
E_c /MPa	3.35×10^4	A_{s2} /mm ²	226
E_s /MPa	2.11×10^5	y_c /mm	84
A_{s1} /mm ²	628	n	19

$$H_{RH} = 100 \left[1 + \lambda_1 - \lambda_2 \left(\frac{y}{2\sqrt{t}} + \lambda_3 \right)^{-2} \right] \times 100 \tag{9}$$

式中: H_{RH} 为相对湿度; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为常数项,其取值见表 2。

表 2 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的取值

水灰比	截面周围温度/°C	相对湿度/%	$\lambda_1/10^{-3}$	$\lambda_2/10^{-3}$	$\lambda_3/10^{-3}$
0.4	20	60	7.9	1.5	2.2
0.4	30	90	8.0	3.5	5.3

按式(9)计算,得到截面沿梁高度方向的相对湿度分布(见图 4)。将相对湿度与收缩应变计算公式结合,计算得到矩形截面收缩应变在梁高度方向的分布(见图 5)。结合收缩应变值及式(2)~(4)、式(7)~(8),计算得到沿梁高度方向由非均匀收缩引起的截面自应力(见图 6)。

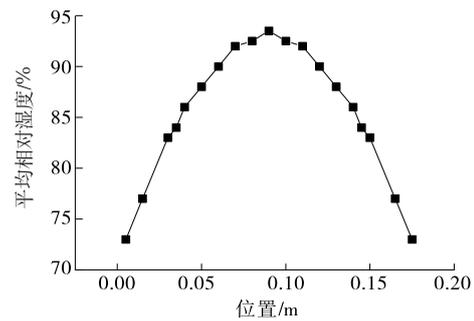


图 4 混凝土收缩徐变 400 d 时矩形截面相对湿度分布

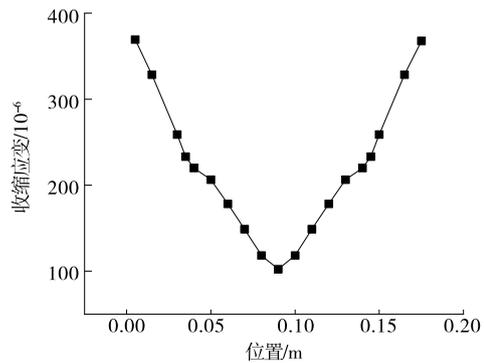
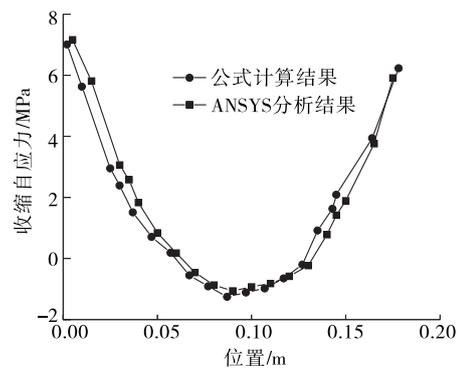


图 5 混凝土收缩徐变 400 d 时矩形截面的收缩应变分布



正为拉应力,负为压应力。下同

图 6 收缩自应力公式计算结果与有限元分析结果的比较

建立 ANSYS 模型时,混凝土采用 Solid 95 单元模拟,钢筋采用 Link 8 单元模拟,采用分离式方法对上述材料建立模型,混凝土收缩徐变预测模型采用 CEB 模型。建立矩形截面后,对截面进行网格划分。由于上述非均匀收缩自应力公式与截面竖向高度相关,将模型在垂直方向划分为 19 层,并对垂直方向各层混凝土材料赋予不同收缩徐变特征。ANSYS 分析模型见图 7,模型分析结果与公式计算结果的比较见图 6。两者吻合度较高,可利用公式计算钢筋混凝土梁非均匀收缩下自应力。

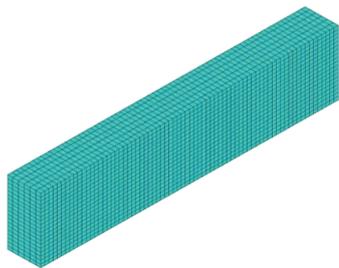


图 7 ANSYS 分析模型

3.2 箱形截面非均匀收缩自应力

将不同时间下箱形截面内部混凝土相对湿度与非均匀收缩效应引起的自应力计算公式相结合,分析 90 d、100 d、120 d、240 d、360 d 时由非均匀收缩引起的自应力变化规律。90 d、100 d、120 d、240 d、360 d 时各区域的平均相对湿度见图 8。

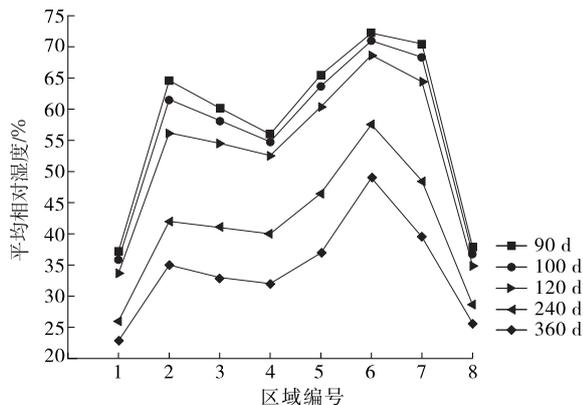


图 8 不同时间下箱形截面各区域的平均相对湿度

按非均匀收缩效应下收缩自应力计算公式计算 90 d、100 d、120 d、240 d、360 d 时钢筋混凝土截面产生的非均匀收缩自应力,其中湿度采用各区域的平均湿度,温度假设在梁高度方向无变化。代入各区域的平均相对湿度,利用 MATLAB 进行计算处理,得到收缩应变曲线和非均匀收缩自应力变化曲线(见图 9、图 10)。

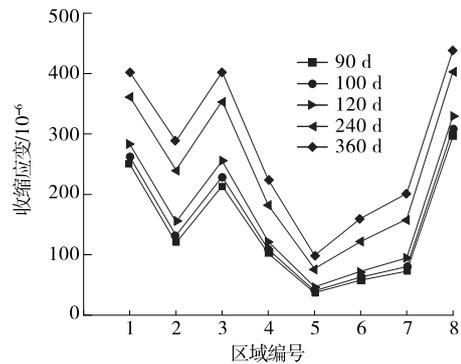


图 9 不同时间时箱形截面内部混凝土收缩应变曲线

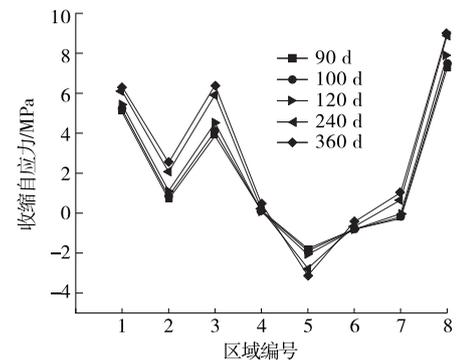


图 10 不同时间时箱形截面内部混凝土非均匀收缩自应力变化曲线

箱形截面不同区域湿度扩散程度不同,导致各区域内相对湿度不同,进而导致不同区域的收缩应变存在很大差距。非均匀收缩在箱梁截面顶部、底部产生拉应力,在箱梁截面腹板位置产生压应力,随着时间的推移,应力值不断加大,第 360 d 时非均匀收缩自应力最大,为 9 MPa,非均匀收缩效应对箱梁截面整体应力的影响极大。

4 结论

本文根据平截面假定等原理推导箱形截面非均匀收缩自应力计算公式,并建立 ANSYS 分析模型对箱形截面内部湿度进行模拟、对非均匀收缩自应力计算公式可行性进行验证。确认公式可行后,将箱形截面内部不同区域的平均相对湿度代入公式,从湿度扩散的角度对箱形截面非均匀收缩自应力进行计算分析。结果表明,非均匀收缩产生的自应力在箱形截面顶板和底板均会产生不同程度的拉应力,但随着截面逐渐靠近中部,平均相对湿度逐渐增大,非均匀收缩自应力逐渐变为压应力,且随着时间的推移,拉、压应力逐渐增大,在第 360 d 时拉应力

(下转第 109 页)

龙温差条件下,通过解析公式法和有限元法计算所得顶推力的偏差均小于 3%,解析公式法作为一种简便的力学计算方法是可行的,可为同类型桥梁合龙顶推施工提供理论参考和简便计算。

参考文献:

- [1] 周军生,楼庄鸿.大跨径预应力混凝土连续刚构桥的现状和发展趋势[J].中国公路学报,2000,13(1):31-37.
- [2] 方美平,陈欣韵,王旭燧,等.不对称小半径曲线连续刚构桥合龙顶推效应分析[J].公路与汽运,2021(3):114-118.
- [3] 渠述锋,孟栋梁,杨孟刚.考虑桥墩实测刚度的墩梁固结桥梁合龙顶推力调整简化算法[J].铁道科学与工程学报,2020,17(11):2864-2872.
- [4] 赵永华,杨建荣,曾章波.预应力混凝土连续刚构桥中跨合龙段顶推力计算与分析[J].施工技术(中英文),2023,52(6):22-27.
- [5] SHAN R X, SHAN Y H. The confirmation of closure jacking force in continuous rigid frame bridge[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 638: 987-993.
- [6] 任翔,余兴,王璐,等.非对称高墩连续刚构桥跨中合龙顶推力研究[J].公路工程,2022,47(1):1-6+19.
- [7] 李军,曾一帆,陈辉,等.大跨径连续刚构桥中跨合龙顶

推力研究[J].铁道科学与工程学报,2015,12(2):335-341.

- [8] 余钱华,唐兵,高齐松.连续刚构桥合龙顶推力计算方法研究[J].交通科学与工程,2023,39(4):62-69.
- [9] 申亚洲.合龙顶推对桥梁线形及应力分布的影响分析[J].公路与汽运,2016(5):184-187.
- [10] 刘文强,徐岳,杨光,等.刚构-连续组合体系梁桥合龙温度影响分析[J].公路,2020,65(9):96-101.
- [11] 梁乾敏,邬晓光,邓淇元.多跨连续刚构桥合龙顶推力的优化[J].铁道建筑,2020,60(11):36-39.
- [12] ZHANG F, WANG Y. Studies on closure jacking force and closure temperature of the continuous rigid frame bridge with V-shaped pier[C]//2018 7th International Conference on Sustainable Energy and Environment Engineering (ICSEEE 2018). Atlantis Press, 2019: 280-285.
- [13] 万振江,安平和,殷任宏,等.基于裂缝控制的连续刚构桥合理合龙顶推力[J].筑路机械与施工机械化,2019,36(1):105-109.
- [14] 孟晓.运用等效系统法原理计算变刚度梁[J].盐城工学院学报,2001,14(1):39-42.

收稿日期:2023-09-23

(上接第 102 页)

达到最大值 9 MPa,非均匀收缩效应对箱形截面整体应力的影响极大。

参考文献:

- [1] 许红胜,刘岐,颜东煌,等.连续刚构桥悬臂施工过程中主梁变形影响因素研究[J].公路与汽运,2021(6):102-105.
- [2] 黄海东,向中富,郑皆连.PC 箱梁桥非均匀收缩变形分析[J].土木建筑与环境工程,2009,31(4):60-65+97.
- [3] 窦晓雪.预应力钢管混凝土管早龄期温、湿度场及耦合应力场分析[D].郑州:华北水利水电大学,2023.
- [4] 张文伟.早龄期混凝土温湿度场试验研究及数值模拟[D].西安:西安理工大学,2022.

[5] 李云峰,吴胜兴.基于湿度扩散理论的混凝土早期收缩分析[J].水力发电,2005,31(12):31-33.

- [6] BAZANT Z P, YU Q, LI G H. Excessive long-time deflections of pre-stressed box girders. I: record-span bridge in palau and other paradigms[J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(6): 676-686.
- [7] 王永宝,贾毅,赵人达.基于 ANSYS 的混凝土内湿度场计算方法[J].西南交通大学学报,2017,52(1):54-60.
- [8] 刘小洁.自密实混凝土梁长期变形性能研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [9] 王家赫.普通与内养护混凝土湿度场及收缩应力研究[D].北京:清华大学,2018.

收稿日期:2023-08-02