

混凝土结构空间多尺度相对湿度值

徐 宁, 黄庆华, 张伟平, 顾祥林

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘 要:针对环境作用具有空间分布特性, 借鉴空间多尺度环境作用模型框架(包括全局环境、地区环境、工程环境、构件表面环境、内部环境)及其数学模型, 对相对湿度进行了空间多尺度研究: 在分析空间各尺度上相对湿度的不同影响因素的基础上, 由全局环境尺度开始, 通过地区环境尺度、工程环境尺度以及构件表面环境尺度上环境因素的逐步调整, 最终计算得到混凝土内部的相对湿度值。研究表明, 采用“常规统计模型+空间残差”的方法, 可有效建立地区环境尺度上的相对湿度值与工程环境尺度上相对湿度值的定量关系; 混凝土结构构件的表面相对湿度与表面温度有关; 实际工程结构应考虑构件表面相对湿度与内部相对湿度之间的不同。

关键词:结构; 空间多尺度; 环境作用; 相对湿度

中图分类号: TU375 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2012)01-0035-07

Spatial Multi-scale Relative Humidity Values for Concrete Structures

XU Ning, HUANG Qing-hua, ZHANG Wei-ping, GU Xiang-lin

(Department of Building Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: According to the spatial features of environmental actions, on the basis of the spatial multi-scale model framework (including the global environment, regional environment, engineering environment, surface environment and internal environment of concrete) and the mathematic model for environmental actions, the spatial multi-scale relative humidity values for concrete structures were studied. That is, based on the influential factors of relative humidity on the different spatial scales, the relative humidity values in concrete were deduced by adjustment step by step from the values on the global environment to the regional environment, the engineering environment and the surface environment of concrete. It was found that using the superposition method of conventional statistic model and spatial residual error, the quantitative relationship of relative humidity values in the regional environmental scale and the engineering environmental scale can be established effectively. Moreover, the relative humidity values on the surface of concrete structural elements are related with the temperature values on the surface of concrete structural elements, and the difference of relative humidity values between the surface and the inner part of concrete should be considered in the durability assessment of concrete structures.

Key words: structure; spatial multi-scale; environmental action; relative humidity

混凝土结构的耐久性已成为土木工程界日益关注的问题^[1-3]。在影响混凝土结构耐久性能的环境作用中, 相对湿度成为重要的环境作用之一。混凝土

土中的不均匀湿度分布不仅会引起干缩变形, 导致混凝土表面产生拉应力出现裂缝, 为外部复杂环境作用的渗入提供便利^[4]; 而且, 相对湿度本身也对引

收稿日期: 2011-06-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2009CB623200); 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2006AA04Z415)

作者简介: 徐 宁(1980-), 男, 博士生, 主要从事混凝土结构的耐久性研究, (E-mail) 123xn@tongji.edu.cn。

顾祥林(通讯作者), 男, 教授, 博士生导师(E-mail) gxl@tongji.edu.cn。

起材料或结构性能劣化的各种作用,如混凝土碳化、氯盐侵蚀、钢筋锈蚀等产生影响。

对混凝土碳化作用来说,环境相对湿度通过温湿平衡决定着混凝土的孔隙水饱和度,一方面影响 CO_2 的扩散速度,另一方面,由于混凝土碳化化学反应均需溶液中或固液界面上进行,相对湿度也是决定碳化反应快慢的主要因素之一^[5]。当环境相对湿度过高时,混凝土接近饱水状态, CO_2 的扩散速度缓慢;当相对湿度过低时,混凝土处于干燥状态,虽然 CO_2 的扩散速度快,但缺少碳化反应所需的液相环境,碳化也难以发展。混凝土的相对湿度对氯离子在混凝土中的传输有重要影响^[6]。混凝土相对湿度较低时,混凝土内部的氯离子传输速度将显著降低,这是由于相对湿度降低,混凝土孔隙溶液水分减少,离子在孔隙中传输更加困难。如果混凝土相对湿度很低,当有外界环境介质渗入时,离子以毛细管吸入机制占据主导地位,离子的吸入速度反而随混凝土相对湿度降低而加快。环境相对湿度对钢筋锈蚀速度也有影响:孔隙水饱和度是影响混凝土电阻抗的主要因素,相对湿度越高,孔隙水饱和度越大,混凝土的电阻抗越小,有利于 OH^- 的扩散;另一方面,孔隙水饱和度又是影响 O_2 扩散速度的主要因素,孔隙水饱和度越大, O_2 扩散越缓慢,不利于阴极反应的进行。

可见,混凝土内部环境作用特别是湿度分布的研究是混凝土结构耐久性研究的一项重要内容。为描述混凝土内部不同湿度场,可在混凝土内部布设湿度传感器进行测量,但是混凝土耐久性是个日积月累的长期过程,仅仅通过布设数量有限的传感器以及采集有限周期的混凝土内部相对湿度值,不能完全描述相对湿度对混凝土性能的整个影响过程。在中国,具有历史记录的相对湿度数据存在于全国各个气象站点内。在不考虑时间因素影响的前提下,建立从已有气象站点的相对湿度值到混凝土内部各个位置处的湿度值的理论模型,成为混凝土结构耐久性研究中的关键科学问题之一。本文根据建立的空间多尺度环境作用模型框架及其数学模型,对相对湿度的空间特性进行研究,即通过空间各尺度上影响相对湿度的不同环境因素的逐步调整,计算混凝土结构内部任意位置处的相对湿度值,为正确预估影响混凝土结构耐久性的各种作用效果提供基本依据。

1 空间多尺度环境作用模型

中国地形条件复杂,气候多种多样。不同地区的混凝土结构所受环境作用不同,即便是同一地区的混凝土结构构件,其不同部位的环境作用也不尽相同。为此,作者在文献^[5]中建立了空间多尺度环

境作用模型用于描述混凝土结构环境作用的空间特性,该模型具体包括全局环境、地区环境、工程环境、构件表面环境及内部环境 5 个不同尺度。

具有历史记录的相对湿度数据可由各气象站点获得。利用建立的空间多尺度环境作用模型,通过各种环境尺度上环境因子的逐步修正,最终可以较准确地获得混凝土内部任意点处的相对湿度值。

由于前期环境作用研究采用的气象资料的统计年限为 1976—2005 年^[7],所以,以初始年 1976 年的年均相对湿度为例,进行相对湿度的空间多尺度分析。

2 全局环境及地区环境尺度上的相对湿度值

由于 1976 年年平均相对湿度值可通过全国分布的各气象站点获得,而现有中国气象站点的观测距离均在 1 000 km 之内,按照混凝土结构空间多尺度环境作用模型框架,此范围属于地区环境范畴,所以可以直接从地区环境尺度开始逐步进行以下几个尺度的研究。此时,全局环境尺度系指混凝土结构所在的中国版图范围。

3 工程环境尺度上的相对湿度值

考虑地区环境尺度上的各种环境条件的影响,通过地区环境尺度上已有气象站点的大气相对湿度值,利用地理信息系统(Geographic Information System,简称 GIS)技术,获得中国区域内工程环境尺度上(1 km×1 km)任意位置处的大气相对湿度值。

大气相对湿度在地区环境尺度上的影响因素主要为空间分布的地理要素,如地理位置(包括经度、纬度、海拔和离海远近)、大的山脉走向等。一个地区的相对湿度值与该地区的经度、纬度和海拔高度具有较好的线性相关关系,可用以下多元线性回归方程表示^[8-10]:

$$RH_0 = a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z \quad (1)$$

式中: RH_0 为常规统计模型模拟的相对湿度值,%; X 为经度; Y 为纬度; Z 为海拔高度,m; a_0 为常数; a_1 、 a_2 、 a_3 为回归系数。

采用“常规统计模型+空间残差”的方法可消除直接采用空间插值方法的不足^[11],更加准确地建立由地区环境尺度到工程环境尺度上相对湿度的定量描述。具体步骤如下:

1)基于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),统计中国间距为 100 km 以上的 200 个气象站点 1976 年的平均相对湿度值,剔除塔中、米林、温州、桦甸 4 个不连续站点数据,选取 180 个气象站点的相对湿度值按式(1)进行回归统计分

析(其余 16 个站点用作模型验证)(图 1),得到如下常规统计模型:

$$RH_0 = 49.568 + 0.534X - 1.201Y - 0.002Z \quad (2)$$



图 1 计算和检验气象站点分布图

2) 基于美国太空总署和国防部国家测绘局联合测量的中国 SRTM 数据(全称为 Shuttle Radar Topography Mission, 即航天飞机雷达地形测绘使命 <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>), 采用 ArcGIS 软件进行转化处理, 得到中国数字高程模型(Digital Elevation Model, 简称 DEM), 并由此可提取全国 1 km×1 km 范围内各采样点的地理信息(如经度、纬度和海拔信息等)。代入式(2)可得到全国任意 1 km×1 km 采样点范围内的 1976 年年平均相对湿度值(图 2)。

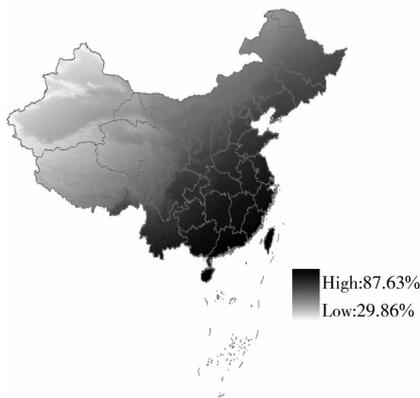


图 2 常规统计模型计算图(1976 年年平均相对湿度)

3) 将 180 个残差值(实测值与通过统计模型获得的计算值的差值)在中国区域内进行空间插值, 得到全国任意 1 km×1 km 采样点上的残差值 ΔRH (图 3)。将此空间残差值与步骤(2)中得到的计算值(图 2)进行叠加, 即获得工程环境尺度上全国范围内 1976 年平均相对湿度的分布图(图 4)。

4) 选取剩余 16 个检验站点(实测值与计算值见表 1), 分别通过相关系数 (R^2)、平均绝对误差

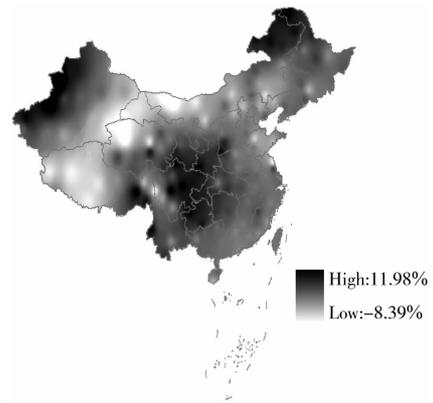


图 3 1976 年全国年平均相对湿度残差分布图

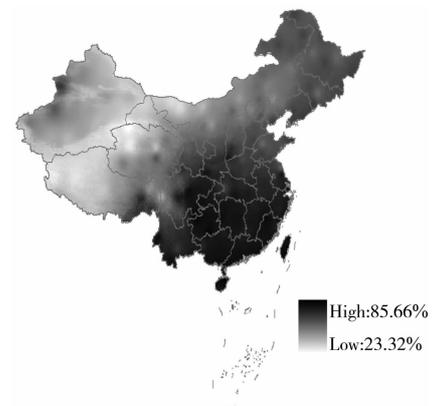


图 4 1976 年全国年平均相对湿度分布图

(Mean Absolute Error, 简称 MAE) 和均方根误差 (Root Mean Square Error, 简称 RMSE) 3 个统计值进行检验, 检验结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 采用“常规统计模型+空间残差”的方法计算得到的中国 1976 年平均相对湿度值的计算精度较直接统计计算值有明显提高。

表 1 检验站点的大相对湿度度值 / %

气象站点	实测值	常规统计值	常规统计值+空间残差
鸡西	61	64.71	64.46
临汾	64	65.22	61.83
高邮	76	73.97	71.84
金华	76	78.47	76.74
麻城	74	73.27	74.24
广州	79	82.26	79.89
达尔罕茂明安联合旗	50	55.66	50.58
中宁	54	58.43	58.01
广元	69	65.58	74.97
贵阳	78	72.39	80.60
格尔木	30	43.85	39.75
且末	39	46.94	44.27
额尔古纳右旗	69	52.24	61.79
精河	62	49.36	54.39
德钦	72	60.15	59.66
拉萨	42	54.04	49.52

表 2 检验指标列表

检验指标取值	常规统计模型	常规模型+空间残差
R^2	0.680	0.851
MAE	6.726	4.657
RMSE	8.338	5.786

4 工程环境尺度上相对湿度的修正

通过地区环境尺度到工程环境尺度的研究所得到的全国每 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 范围内 1976 年年平均相对湿度分布图,是从全国 180 个城市市区气象站点的环境作用值开始计算的,没有考虑工程环境尺度上其它环境条件(如热岛效应、湿岛和干岛效应等)的影响,城、郊环境作用差别没有体现。对于大气相对湿度,需要考虑城市干、湿岛效应造成的城、郊相对湿度差的影响。

为此,可统计 1976 年全国 31 个省会城市城区与郊区气象站点的大气相对湿度值,并定义城区气象站点与郊区气象站点的相对湿度差为当年的干湿岛强度值。剔除南宁、沈阳、天津由于站点迁移或区站号变动带来的干湿岛强度突变点,用剩余全国 28 个省会城市干湿岛强度值作为初始值,采用 ArcGIS 地理信息处理软件,通过反距离权重(Inverse Distance Weighted,简称 IDW)插值方法^[7],可计算得到 1976 年干湿岛强度分布图,如图 5 所示。

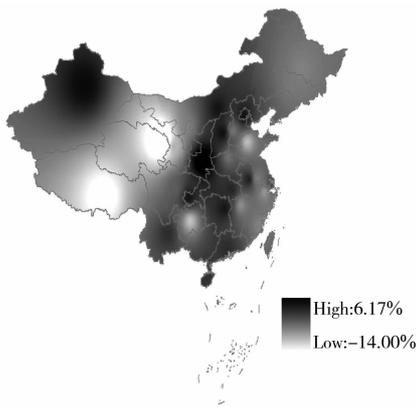


图 5 1976 年全国干湿岛强度分布图

从图 5 中可以提取全国任意经纬度处 1976 年的干湿岛强度值。将图 4 中的相对湿度值减去图 5 中对应点处的干湿岛强度值,即可准确获得 1976 年郊区混凝土结构所处的相对湿度值。

5 构件表面环境尺度上的相对湿度值

自然环境下混凝土结构表面各点处的环境作用不同,其影响因素主要有 2 种:1)混凝土构件的外部

条件,如结构所在的地理位置和所处的季节、云、雪、雾、雨等;2)混凝土构件的内部因素,包括构件表面材料、构件材料物理特性等^[12]。

混凝土表面相对湿度 RH_s 可通过以下方程求得^[13]:

$$RH_s = \frac{RH_{air} \cdot v_s(T_{air})}{v_s(T_s)} \quad (3)$$

式中: RH_{air} 为大气相对湿度,%; $v_s(T)$ 为指定温度下饱和水蒸汽含量, g/m^3 ; T_{air} 为大气温度, K; T_s 为混凝土表面温度, K。

指定温度下空气饱和蒸汽含量 $v_s(T)$ 与饱和蒸汽压 $p_s(T)$ 的关系可由理想气体状态方程(式(4))变换得到(式(5)):

$$PV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad (4)$$

$$v_s = \frac{m}{V} = \frac{PM}{RT} = \frac{p_s M}{RT} \quad (5)$$

式中: m 为气体质量, g; V 为气体体积, m^3 ; M 为气体摩尔质量, g/mol ; R 为比例系数,一般取 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为气体温度, K。

饱和蒸汽压 $p_s(T)$ 可用以下公式表示^[14]:

$$\ln p_s(T) = 68.148 - \frac{7214.64}{T} - 6.2973 \ln T \quad (6)$$

由式(3)可以看到,混凝土表面相对湿度值与混凝土周围环境相对湿度值、周围环境温度值和混凝土表面温度值密切相关。选取上海市中山北二路上的一座公路桥(经度: 121.5°E , 纬度: 31.3°N)进行计算。从图 4 中提取的该经纬度处的大气相对湿度为 77.92% ,从图 5 中提取的此经纬度处的干湿岛强度为 -0.94% 。考虑城市干湿岛效应后,该经纬度处修正后的大气相对湿度为 $RH_{air} = 77.92 - (-0.94) = 78.86\%$ 。假定桥梁所处周围环境 1976 年年均温度为 $T'_{air} = 15.14$,对应的绝对温度为 $T_{air} = 15.14 + 273.15 = 288.29 \text{ K}$,则由式(6)可计算该桥梁所处周围环境温度下的空气饱和蒸汽压为:

$$\ln p_s(T_{air}) = \ln p_s(288.29) =$$

$$68.148 - \frac{7214.64}{288.29} - 6.2973 \ln(288.29) \approx 7.455$$

$$p_s(T_{air}) = e^{7.455} \approx 1.7279 \text{ kPa}$$

由式(5)得饱和蒸汽含量为:

$$v_s(T_{air}) = \frac{m}{V} = \frac{PM}{RT} = \frac{p_s M}{RT} = \frac{1.7279 \times 18}{8.314 \times 288.29} \approx 0.01298 \text{ kg}/\text{m}^3 = 12.98 \text{ g}/\text{m}^3$$

同理,假定该经纬度处桥梁行车道板上表面 1976

年年均温度为 $T'_s = 21.14^\circ\text{C}$, 对应的绝对温度为 $T_s = 21.14 + 273.15 = 294.29\text{ K}$, 则此温度下的空气饱和蒸汽压为:

$$\ln p_s(T_s) = \ln p_s(294.29) = 68.148 - \frac{7214.64}{294.29} - 6.2973 \ln(294.29) \approx 7.86$$

$$p_s(T_s) = e^{7.86} \approx 2.59152\text{ kPa}$$

对应的饱和蒸汽含量为:

$$v_s(T_s) = \frac{m}{V} = \frac{PM}{RT} = \frac{p_s M}{RT} = \frac{2.59152 \times 18}{8.314 \times 294.29} \approx 0.01907\text{ kg/m}^3 = 19.07\text{ g/m}^3$$

将上述参数代入式(3)得该经纬度处桥梁行车道板的表面相对湿度为:

$$RH_s = \frac{RH_{\text{air}} \cdot v_s(T_{\text{air}})}{v_s(T_s)} = \frac{78.86 \times 12.98}{19.07} \approx 53.68\%$$

同理,由该桥梁结构翼板和底板底面 1976 年年平均温度 18.42°C , 可计算得到对应的此经纬度处混凝土桥梁结构翼板和底板底面 1976 年年平均相对湿度为 64.63% ; 由阴影腹板表面 1976 年年平均温度 15.37°C , 可计算得到对应的阴影腹板表面 1976 年年平均相对湿度值为 77.75% ; 由受日照腹板表面位置处 1976 年年平均温度 18.93°C , 可计算得到对应的受日照腹板表面位置处 1976 年年平均相对湿度为 62.69% 。

6 构件内部环境尺度上的相对湿度值

对于大气相对湿度而言,进行构件表面环境尺度到内部环境尺度的研究即为相对湿度由混凝土表面向混凝土内部扩散的研究。

基于经典的 Fick 第二定律(式(7)),将上节得到的混凝土构件表面相对湿度值作为内部湿度场计算的边界条件,求解特定环境(恒湿)下混凝土构件内部环境相对湿度。

$$\frac{\partial RH}{\partial \tau} = -D \left(\frac{\partial^2 RH}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 RH}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 RH}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

式中: RH 为相对湿度,%; τ 为时间,s; D 为湿气在混凝土内的扩散系数, m^2/s , 可按下式计算^[15]:

$$D = D_1 \left[\alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + \left(\frac{1 - RH}{1 - RH_c} \right)^n} \right] \quad (8)$$

式中各系数参照 CEB-FIP 模式规范给出: $\alpha_0 = 0.05$; $RH_c = 0.8$; $n = 15$; $D_1 = \frac{D_{1,0}}{f_{ck}/f_{ck0}}$ ($D_{1,0} = 1 \times 10^{-9}\text{ m}^2/\text{s}$; $f_{ck0} = 10\text{ MPa}$; f_{ck} 为混凝土强度标准值)。

令混凝土试件内部初始相对湿度为 RH_0 , 混凝土表面相对湿度为 RH_s 。为简化计算,暂按一维扩散方程进行求解,即:

$$\frac{\partial RH}{\partial \tau} = -D \frac{\partial^2 RH}{\partial x^2} \quad (9)$$

其中,初始条件: $\tau = 0$ 时,对所有 x 值, $RH = RH_0$; 边界条件: $x = 0$ 时,对所有 τ 值, $RH = RH_s$; $x \rightarrow \infty$ 时,对所有 τ 值, $RH = RH_0$ 。

由上式解得混凝土内部相对湿度随时间 τ 的变化规律为:

$$RH = RH_s - (RH_s - RH_0) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot \tau}}\right) \quad (10)$$

式中, $\operatorname{erf}(\varphi)$ 为误差函数; x 为距离混凝土表面的深度,m。

选取强度等级为 C30 的混凝土,其强度标准值为 $f_{ck} = 20.1\text{ MPa}$; 假定混凝土内部初始相对湿度为 $RH_0 = 100\%$, 混凝土表面相对湿度为 $RH_s = 53.68\%$ 。由式(10),可得任意时刻混凝土内部任意位置处的相对湿度 RH 。整个过程通过 Matlab 软件实现,最终计算结果如图 6 及表 3 所示。

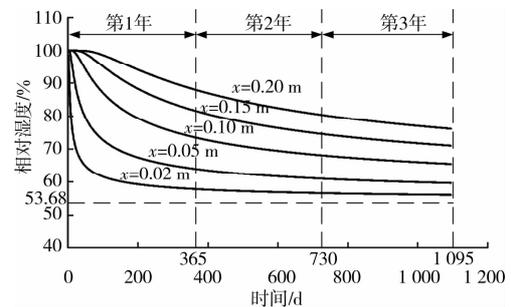


图 6 混凝土内部相对湿度随时变化规律

表 3 混凝土内部相对湿度计算值 /%

时间	0.02 m 处	0.05 m 处	0.10 m 处	0.15 m 处	0.20 m 处
1 d	98.56	100	100	100	100
5 d	84.50	99.26	100	100	100
10 d	77.06	95.92	99.97	100	100
15 d	73.25	92.41	99.75	100	100
50 d	64.78	79.36	94.11	98.87	99.89
100 d	61.59	72.68	86.99	95.10	98.56
365 d	57.84	63.97	73.49	81.61	88.01
545 d	57.09	62.14	70.17	77.38	83.53
730 d	56.63	61.01	68.05	74.56	80.33
1 095 d	56.09	59.68	65.52	71.05	76.17

图 6 描述了 3a 内混凝土内部不同深度相对湿度值的随时变化规律。表 3 列出了部分计算结果。从图 6 可以看到,由于混凝土内外相对湿度差的影

响,混凝土内部不同深度处的相对湿度值由初始值的 100% 发生了不同程度的降低;2a 后,不同深度处的相对湿度值变化近趋平缓。结合表 3 还可以看出,表层混凝土($x=0.02\text{ m}$)较深层混凝土($x=0.20\text{ m}$)对相对湿度的感应迅速,表层混凝土相对湿度值降低程度较快,经过 50 d 的时间,表层混凝土相对湿度值已经降至初始湿度值的 2/3 左右(为 64.78%),而深层混凝土相对湿度基本没有变化;由于初始混凝土表面相对湿度(53.68%)与混凝土内部相对湿度(100%)差值较大,所以经过 3 a(1 095 d)的时间,距混凝土表面 0.02 m 处的混凝土相对湿度值(56.09%)还未达到初始混凝土表面相对湿度值(53.68%)。

根据图 6 中各曲线与时间轴所围成的面积和年均相对湿度值与时间轴围成的面积相等的原则,可计算得到混凝土内部不同深度的年均相对湿度值,如表 4 所示。

表 4 混凝土内部年均相对湿度值 /%

深度/m	第 1 年	第 2 年	第 3 年
0.02	61.18	56.97	56.18
0.05	70.86	62.07	60.11
0.10	82.55	70.14	66.47
0.15	90.01	77.35	72.44
0.20	94.51	83.47	77.86

由表 4 可以看出,就相对湿度而言,从年平均意义上讲,即便混凝土结构构件处于外部恒定的相对湿度下,内部相对湿度值也不相同。因此,对于非恒定相对湿度下的混凝土结构构件更应考虑混凝土内、外部环境的不同,明确环境作用时间变化的影响,进一步开展混凝土结构环境作用时间特性的研究。

7 结论

1)应用多尺度环境作用模型,可以将全国范围内具有历史记录的气象站点的相对湿度值,通过各尺度上的逐步修正,计算得到混凝土内部的相对湿度值。

2)采用“常规统计模型+空间残差”的方法,可有效建立地区环境尺度上相对湿度值与工程环境尺度上相对湿度的定量关系。

3)混凝土结构构件的表面相对湿度与混凝土表面温度有关,混凝土桥梁结构行车道板、翼缘、腹板等不同部位处的表面相对湿度值不同。

4)实际工程中的混凝土结构构件,应该考虑表面相对湿度与混凝土内部相对湿度的不同,相对湿

度值随时间变化的特性有待进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 张誉,蒋利学,张伟平,等. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003.
- [2] TEPLY B, VORECHOVSKA D, KERSNER Z. Performance-based design of concrete structures: durability aspects [J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2010,35(4):535-538.
- [3] VORECHOVSKA D, TEPLY B, CHROMA M. Probabilistic assessment of concrete structure durability under reinforcement corrosion attack [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2010,24(6):571-579.
- [4] RYU D W, KO J W, NOGUCHI T. Effects of simulated environmental conditions on the internal relative humidity and relative moisture content distribution of exposed concrete [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2011,33(1):142-153.
- [5] 徐宁,顾祥林,黄庆华,等. 混凝土结构环境作用研究方法[J]. *结构工程师*, 2010,26(2):162-167.
XU NING, GU XIANG-LIN, HUANG QING-HUA, et al. Study method of environmental action for concrete structures[J]. *Structural Engineers*, 2010,26(2):162-167.
- [6] 张庆章,黄庆华,张伟平,等. 海水潮汐区混凝土氯盐侵蚀加速试验方法研究[J]. *结构工程师*, 2010,26(3):145-153.
ZHANG QING-ZHANG, HUANG QING-HUA, ZHANG WEI-PING, et al. Study on accelerated chloride penetration testing methods for concrete in tidal zone[J]. *Structural Engineers*, 2010,26(3):145-153.
- [7] 徐宁,顾祥林,黄庆华,等. 工程环境尺度上混凝土结构环境作用研究[J]. *北京工业大学学报*, 2011,37(S1):34-41.
XU NING, GU XIANG-LIN, HUANG QING-HUA. Study on environmental action for concrete structures on engineering environment scale[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2011,37(S1):34-41.
- [8] 张洪亮,倪绍祥,邓自旺,等. 基于 DEM 的山区相对湿度空间模拟方法[J]. *山地学报*, 2002,20(3):360-364.
ZHANG HONG-LIANG, NI SHAO-XIANG, DENG ZI-WANG, et al. A method of spatial simulating of temperature based digital elevation model (DEM) in mountain area [J]. *Journal of Mountain Research*, 2002,20(3):360-364.
- [9] 李晓燕,王宗明,宋开山,等. 松嫩平原气候数据空间分布模型及栅格化信息系统的建立[J]. *中国农业气象*, 2007,28(1):76-79.

- LI XIAO-YAN, WANG ZONG-MING, SONG KAI-SHAN, et al. Establishment of spatial distribution models and grid information system for climate data in Songnen plain[J]. Chinese Journal of Agrometeorology 2007,28(1):76-79.
- [10] 王宗明,宋开山,张柏,等. 东北地区农业气候资源空间分布模型的建立[J]. 中国农学通报, 2007,23(11): 351-357.
- WANG ZONG-MING, SONG KAI-SHAN, ZHANG BAI, et al. Establishment of spatial distribution models for agricultural climate resources data in Northeast China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(11):351-357.
- [11] 蔡福,于贵瑞,祝青林,等. 气象要素空间化方法精度的比较研究—以平均气温为例[J]. 资源科学, 2005,27(5):173-179.
- CAI FU, YU GUI-RUI, ZHU QING-LIN, et al. Comparison of precisions between spatial method of climate factors: a case study on mean air temperature [J]. Resources Science, 2005,27(5):173-179.
- [12] PENTTALA V. Surface and internal deterioration of concrete due to saline and non-saline freeze-thaw loads [J]. Cement and Concrete Research, 2006,36(5): 921-928.
- [13] LINDVALL A. Modeling of the influence from environmental actions on the durability of reinforced concrete structures [C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, Boca Raton: Crc Press-Taylor & Francis Group, 2009:145-146.
- [14] 李春秋,李克非,陈肇元. 混凝土中水分传输的边界条件研究[J]. 工程力学,2009,26(8):74-81.
- LI CHUN-QIU, LI KE-FEI, CHEN ZHAO-YUAN. On the boundary condition of moisture transport in concrete[J]. Engineering Mechanics, 2009,26(8):74-81.
- [15] CEB-FIP. CEB-FIP model code for concrete structures [S]. Lausanne, Switzerland: Thomas Telford, 1990.

(编辑 胡英奎)

(上接第 20 页)

- [10] 魏洋,吴刚,吴智深,等. FRP 约束混凝土矩形柱有软化段时的应力-应变关系研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 21-28.
- WEI YANG, WU GANG, WU ZHI-SHEN, et al. Study on the stress-strain relationship for insufficient FRP-confined rectangular concrete columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(3):21-28.
- [11] 金熙男,潘景龙,刘广义. 增强纤维约束混凝土轴压应力-应变关系试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(4): 47-53.
- JIN XI-NAN, PAN JING-LONG, LIU GUANG-YI, et al. Research of stress-strain curve of concrete confined by fiber referenced plastics under axial compression[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(4): 47-53.
- [12] MARWAN N Y, MARIA Q F, AYMAN S M. Stress-strain model for concrete confined by FRP composites [J]. Composites Part B-Engineering, 2007, 38(5/6): 614-628.
- [13] 吴刚,吴智深,吕志涛. FRP 约束混凝土圆柱有软化段时的应力-应变关系研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(11): 7-14.
- WU GANG, WU ZHI-SHEN, LÜ ZHI-TAO. Study of the stress-strain relationship of FRP-confined circular concrete column with a strain-softening response[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(11): 7-14.
- [14] ZHANG DIAN-JIE, WANG YUAN-FENG. Compressive behaviour of FRP-confined square concrete columns after creep[J]. Engineering Structures, 2010, 32(8): 1957-1963.
- [15] 滕锦光,陈建飞,史密斯 S T,等. FRP 加固混凝土结构[M]. 李荣,滕锦光,顾磊. 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

(编辑 王秀玲)