

混凝土结构时间多尺度环境作用研究

顾祥林, 徐 宁, 黄庆华, 张伟平

(同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要: 不考虑环境作用在时间和空间上的相关性, 以确定环境作用代表值的“时间计算尺度”和环境作用的时变规律为特征, 以引起混凝土碳化的环境作用为例, 对环境作用(主要为大气温度、相对湿度)的时间特性进行了详细分析. 结果表明, 可以采用“年均”计算尺度或修正后的“年均”计算尺度计算引起混凝土结构碳化的环境作用代表值; 采用 Holt-Winters 模型可以较准确地描述环境作用的时变规律. 确定了合适的时间计算尺度和环境作用的时变规律, 可以更加方便地预测混凝土结构的碳化深度.

关键词: 混凝土结构; 时间多尺度; 环境作用; 混凝土碳化; 温度; 相对湿度

中图分类号: TU37

文献标识码: A

Temporal Multi-scale Environmental Actions for Concrete Structures

GU Xianglin, XU Ning, HUANG Qinghua, ZHANG Weiping

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

Abstract: Without considering the correlation in time and space for environmental actions, the features of time of environmental actions such as temperature and relative humidity were analyzed in detail on the basis of the characteristics of the “time calculation scale” for the representative value of environmental actions and the variation of environmental actions with time as well as an example about the carbonation of concrete due to the main environmental actions. It was found that the mean annual value and the adjusted mean annual value can be regarded as the representative value of environmental actions for the calculation of carbonation of concrete, and the Holt-Winters method can be used to describe the variation of the environmental actions well. Determining the appropriate “time calculation scale” and the variation of environmental actions with time, the carbonation depth of concrete

structures can be predicted easily and precisely.

Key words: concrete structure; temporal multi-scale; environmental action; carbonation of concrete; temperature; relative humidity

混凝土结构作为土木工程中最常用的结构形式之一, 近年来发展迅速, 但随之也出现了新的问题. 许多结构没有达到设计使用年限就出现了不同程度的损伤, 有的甚至倒塌, 造成了重大的经济损失. 产生这些问题的原因很多, 除结构的设计抗力不足、使用荷载的不利变化、施工及其他因素外, 外部环境是导致混凝土结构耐久性能退化的主要原因之一^[1-3].

国内外众多学者已经注意到外部环境对混凝土结构耐久性能的影响, 并开展了诸多研究. 内容主要集中在混凝土结构的环境影响因素、劣化机理及环境侵蚀模型的研究、自然环境与加速环境相似性的研究等方面, 成果丰硕^[4-6]. 但是, 目前各国学者对环境作用本身研究不多, 现有的国内外混凝土结构设计规范也仅仅停留在对结构所处周围环境的类别及环境作用等级定性划分的层次上^[7-10]. 环境作用自身特性及环境作用定量描述不足.

实际上, 混凝土结构耐久性能劣化是环境气候条件(如大气温度、相对湿度、风速)以及环境侵蚀介质(如 CO₂、氯盐等)共同作用于混凝土结构的结果. 不同地区混凝土结构, 甚至同一地区同一结构的不同部位所受环境作用不同. 另一方面, 任一地区、任一结构的任一部位在不同时刻环境作用也不相同. 即环境作用具有时间和空间的分布特性. 可以将环境作用看作是一个随时间和空间变化的三维曲面, 如图 1 所示.

为使问题简化, 本文暂不考虑环境作用在时间

收稿日期: 2011-02-25

基金项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2009CB623200); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2006AA04Z415)

第一作者: 顾祥林(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为结构全寿命设计与维护、混凝土与砌体结构基本理论等.

E-mail: gxl@tongji.edu.cn

和空间尺度上的相关性,只对环境作用的时间特性进行分析研究.

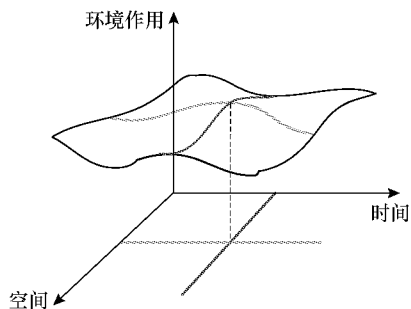


图1 环境作用时空分布

Fig. 1 Spatial-temporal variation of environmental actions

现有大多数耐久性试验(如混凝土碳化或氯盐侵蚀等试验)均是在环境作用(如温度、相对湿度、 CO_2 、氯盐浓度等)为恒定的情况下进行的^[1,11-12],没有考虑环境作用的随时变化,这与混凝土结构所处实际环境并不相符.特别是近年来,大气温度、 CO_2 浓度等环境作用随时间不断增长,如不考虑环境作用随时间的变化将会导致不精确的混凝土结构耐久性预测结果.

另外,由于环境作用有多种时间尺度表述(如日值、月值、年值等),针对混凝土结构耐久性这个长期累积的过程,是取任一时间点的环境作用值还是取某一时段的环境作用平均值进行结构的耐久性评估和耐久性设计直接关系到计算分析的工作量和难易程度,是首先应该解决的关键问题.

为此,以引起混凝土碳化的环境作用为例,在探寻适合于混凝土碳化计算用的“时间计算尺度”的基础上进行环境作用随时间的变化规律研究,为混凝土结构耐久性设计和评估提供合适的环境作用代表值.

1 时间多尺度环境作用

我国气候环境条件复杂,按照混凝土结构外部暴露环境的不同,可将结构所处环境分为大气环境、水环境和土壤环境.其中,大气环境中的主要环境作用有大气温度、大气相对湿度、 CO_2 、酸雨、盐雾;水环境中的主要环境作用有氯盐、水温;土壤环境中的主要环境作用有硫酸盐^[13].混凝土结构所受环境作用随时间不断变化,环境作用按时间尺度分类,主要有秒、分、时、日、月、季、年等多个尺度,如图2所示.

图2中,如果将其中一尺度(如月尺度)作为某

一时刻 t 所对应的最小时间“点”的尺度,那么其他较大尺度则定义为一时间“间隔” Δt (如年尺度取12个月)内所有“点”尺度的集合,可用 Δt 内各“点”尺度的“均值”代表.

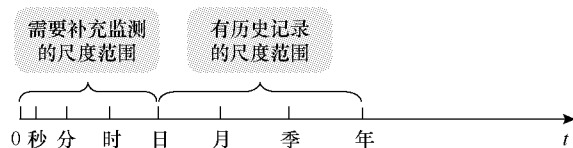


图2 环境作用的时间多尺度

Fig. 2 Temporal multi-scale model of environmental actions

同样描述2009年长春市区气温,如在日尺度上描述,则需要365个日不同数据值(图3);如采用月尺度进行描述,则需要12个月不同数据值(图4);如采用年尺度进行描述,则只需要2009年年均气温 6.1°C 一个值即可.可见,环境作用采用不同的时间尺度进行描述,其环境作用代表值不同.

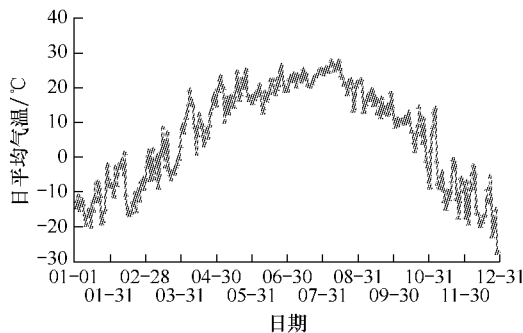


图3 2009年长春市日平均温度

Fig. 3 Mean daily temperatures in Changchun in 2009

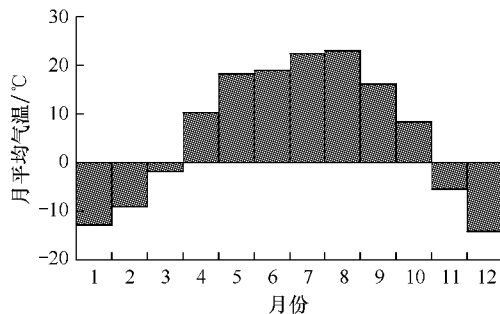


图4 2009年长春市月平均温度

Fig. 4 Mean monthly temperatures in Changchun in 2009

根据现有环境作用(如大气温度、相对湿度)不同时间尺度值的获取情况,可以将图2所示的7个时间尺度划分为2个部分:①有历史记录的尺度范围.通过气象站点和环境监测站点可以很容易获得具有历史记录的日、月、年等不同时间尺度所对应的

各种环境作用值。②需要补充监测的尺度范围。秒、分、时等尺度对应的环境作用值很难通过各气象站点和环境监测站点获得,如需进行分析,可采用监测仪器补充记录不同时刻对应的环境作用值。

本文环境作用时间尺度的研究主要针对目前容易获取且有历史记录の日、月、年等几个时间尺度,并以“日尺度”作为耐久性研究的“点尺度”,分析找出适合于混凝土耐久性计算用的“时间计算尺度”。

2 环境作用时间计算尺度的选取

以引起混凝土碳化的环境作用为例,研究合理的环境作用时间计算尺度。

2.1 考虑环境作用变化的混凝土碳化深度计算

混凝土碳化的影响因素很多,可分为外部因素和内部因素。外部因素主要包括气候条件、环境介质条件、结构承受外荷载情况;内部因素即内部材料特性,主要包括水泥品种、水泥用量、水灰比、骨料品种及级配、掺合料、外加剂、混凝土表面覆盖层等。其中,影响混凝土碳化的环境作用主要有温度、相对湿度及 CO_2 浓度。

对给定的混凝土材料,当环境作用代表值不变时,可用式(1)计算混凝土的碳化深度^[14]:

$$X_c = \begin{cases} 102T(1-R_H)^{1.1} \sqrt{\frac{w/c-0.34}{c} C_{\text{CO}_2}} \sqrt{t} & R_H \geq 55\% \\ 77T \cdot R_H \sqrt{\frac{w/c-0.34}{c} C_{\text{CO}_2}} \sqrt{t} & 0 < R_H < 55\% \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_c 为混凝土的碳化深度, mm; T 为大气温度, $^{\circ}\text{C}$; R_H 为大气相对湿度, %; w 为用水量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c 为水泥用量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; w/c 为混凝土水灰比; C_{CO_2} 为 CO_2 体积分数; t 为碳化时长, d。式(1)可简化为 $X_c = f(T, R_H, C_{\text{CO}_2}) \cdot \sqrt{t}$ 。

当环境作用变化时,不同时刻混凝土碳化深度的发展规律可用图5示意。考虑环境作用变化的 $n \cdot \Delta t$ 时间段内的混凝土总碳化深度 X_{cn} 可用式(2)~(4)表示^[15],其中 n 为时间段的个数。

$$t'_{n-1} = \left(\frac{X_{c,n-1}}{f(T_n, R_{Hn}, C_{\text{CO}_2,n})} \right)^2 \quad (2)$$

$$t_n = t'_{n-1} + \Delta t \quad (3)$$

$$X_{cn} = f(T_n, R_{Hn}, C_{\text{CO}_2,n}) \cdot \sqrt{t_n} \quad (4)$$

2.2 时间计算尺度的选取

影响混凝土碳化的各种环境作用是随时间不断

变化的。假定 C_{CO_2} 值不变,只考虑温度和相对湿度的变化,以时间计算尺度为日的混凝土碳化深度值为准确值,分别选取月计算尺度、季计算尺度以及年计算尺度对基准混凝土 ($c=400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $w/c=0.45$) 碳化深度值进行计算。计算步骤如下:

(1)从中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>) 上获得全国不同区域4个典型城市即长春、乌鲁木齐、拉萨、海口近期2005—2009年的日平均大气温度、日平均相对湿度、月平均大气温度、月平均相对湿度以及年平均大气温度、年平均相对湿度值,并统计出每年季均大气温度及相对湿度值。

(2)借鉴我国青海瓦里关地区(二氧化碳全球基准站)所测得 C_{CO_2} 数据(表1),暂不考虑 C_{CO_2} 随时间变化情况,根据其2004年平均浓度值0.03782%,取4个城市的 C_{CO_2} 为定值,即 $C_{\text{CO}_2}=0.04\%$ 。

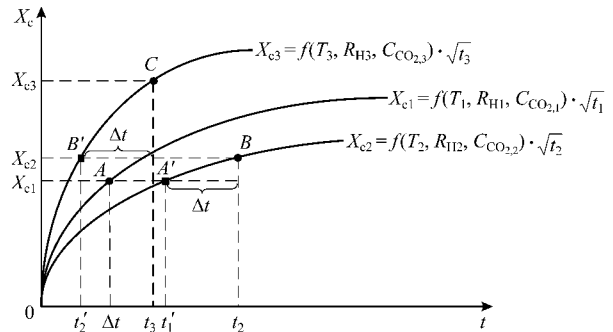


图5 碳化深度发展示意

Fig.5 Development of carbonation depth

表1 瓦里关观测站 CO_2 体积分数年均值

Tab.1 Annual mean CO_2 concentration in Waliguan 10^{-6}

年份	年均值	年份	年均值	年份	年均值
1993	357.4	1997	363.8	2001	371.3
1994	359.2	1998	365.7	2002	372.7
1995	360.6	1999	368.2	2003	376.2
1996	362.2	2000	370.3	2004	378.2

(3)采用式(2)~(4)计算不同尺度下考虑时变环境作用的混凝土碳化深度。由于气温低于 0°C 时,混凝土中的游离水转变成冰,不但缺少碳化化学反应所需的液相环境,碳化扩散速率也大幅降低,碳化难以发展,故对于长春、乌鲁木齐、拉萨三市出现的负温天数,在逐日或逐月计算中设定碳化深度为零,即认为当温度低于 0°C 时,不发生混凝土碳化。

通过以上计算,可分别得到2005—2009年每年长春、乌鲁木齐、拉萨和海口4个城市时间计算尺度分别取日、月、季和年时混凝土碳化深度的计算结

果,如表2所示,其中,日、月、季、年的运算次数分别为365,12,4,1次。

以时间计算尺度为日的混凝土碳化深度计算值为准,对比4个城市的计算结果可以看出:

(1)混凝土碳化深度对环境作用的依赖性很大,随着月、季、年计算尺度的增大,各城市碳化深度误差增大;逐月累加计算值接近逐日累加计算结果,计算量由365次减为12次;逐季累加计算结果计算次数由365次减为4次,但是误差增大。

(2)直接由年均气温和年均相对湿度值进行计算,计算次数由365次减为1次,计算简化,但是不同地区误差不同:对于无负温天数的海口地区,误差在10%左右;对于存在负温天数的长春、乌鲁木齐、拉萨地区,误差较逐季累加计算结果更大。

考虑到混凝土碳化本身具有一定的随机性,所以对于无负温天数的海口地区,可直接取时间计算尺度为年来计算混凝土碳化深度。对于存在负温天数的长春、乌鲁木齐、拉萨等地区,应对年均计算值进行修正。

从式(1)中可以看到,修正项包含两部分:环境

作用值 \bar{T}, \bar{R}_H ;碳化时长 t_i 。分别采用3种不同组合对取时间计算尺度为年时的计算结果进行修正(分别对应表2后6列数据),可知:

(1)年均环境作用值(年均温度、年均相对湿度)取去除温度 $T < 0^\circ\text{C}$ 天数后剩余天数环境作用值的

平均值 $\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^{t_+} T_i}{t_+}$; $\bar{R}_H = \frac{\sum_{i=1}^{t_+} R_{Hi}}{t_+}$,其中, T_i, R_{Hi} 为正温天数 t_+ 所对应的温度、相对湿度值; t_+ 为碳化时长取实际正温天数。

(2)年均环境作用值取去除温度 $T < 0^\circ\text{C}$ 天数后剩余天数环境作用值的平均值;碳化时长取365 d。

(3)遇温度 $T < 0^\circ\text{C}$ 时,令温度 $T = 0^\circ\text{C}$,取365 d环境作用的平均值;碳化时长取365 d。

分别将3种修正结果与以时间计算尺度为日的混凝土碳化深度计算结果比较可以发现(详见表2中倒数第1,3,5列数据),采用第1种方法的修正值可以有效减小计算误差。从图5所示计算方法也可以看出,只有遇到正温天数混凝土碳化才陆续发生,故取第1种修正方法也最为合理。

表2 全国4个典型城市碳化深度比较

Tab.2 Comparison of carbonation depth in four typical cities in China

城市	年份	时间计算尺度及其相对误差							$T < 0^\circ\text{C}$ 时对时间计算尺度为年时的修正						
		X_{cn}/mm				$\eta/\%$ ¹⁾			\bar{T}, \bar{R}_H 为去除 $T < 0^\circ\text{C}$ 天数后剩余天数的平均				遇 $T < 0^\circ\text{C}$, 令 $T = 0^\circ\text{C}$, 365 d的平均		
									碳化时长 t_i 为实际正温天数		碳化时长 t_i 为365 d				
		日	月	季	年	月	季	年	t_i/d	X_{cn}/mm	$\eta/\%$	X_{cn}/mm	$\eta/\%$	X_{cn}/mm	$\eta/\%$
长春	2005	2.33	2.30	2.06	1.28	-1.29	-11.59	-45.06	232	2.86	22.75	3.59	54.08	1.93	-17.17
	2006	2.62	2.53	2.29	1.60	-3.44	-12.60	-38.93	240	3.00	14.50	3.70	41.22	1.91	-27.10
	2007	2.75	2.79	2.95	1.92	1.45	7.27	-30.18	240	3.25	18.18	4.01	45.82	1.87	-32.00
	2008	2.43	2.55	2.30	1.75	4.94	-5.35	-27.98	249	3.00	23.46	3.64	49.79	2.09	-13.99
	2009	2.60	2.63	2.28	1.44	0.44	-12.31	-44.62	228	3.08	18.46	3.90	50.00	1.81	-30.38
乌鲁木齐	2005	2.65	2.86	2.95	1.96	7.92	11.32	-26.04	250	2.95	11.32	3.57	34.72	1.67	-36.98
	2006	2.49	2.69	2.76	2.31	8.03	10.84	-7.23	254	2.93	17.67	3.51	40.96	1.70	-31.73
	2007	2.81	3.10	3.03	2.23	10.32	7.83	-20.64	246	3.06	8.90	3.73	32.74	1.69	-39.86
	2008	2.58	2.73	2.76	2.21	5.81	6.98	-14.34	257	2.87	11.24	3.42	32.56	1.70	-34.11
	2009	2.62	2.80	2.69	2.10	6.87	2.67	-19.85	241	2.92	11.45	3.59	37.02	1.56	-40.46
拉萨	2005	2.30	2.49	2.62	1.95	8.26	13.91	-15.22	333	2.10	-8.70	2.20	-4.35	1.83	-20.43
	2006	2.31	2.44	2.32	1.66	5.63	0.43	-28.14	347	1.74	-24.68	1.78	-22.94	1.61	-30.30
	2007	2.23	2.46	2.36	1.63	10.31	5.83	-26.91	339	1.73	-22.42	1.80	-19.28	1.55	-30.49
	2008	2.25	2.44	2.46	1.67	8.44	9.33	-25.78	334	1.83	-18.67	1.91	-15.11	1.60	-28.89
	2009	2.20	2.34	2.24	1.56	6.36	1.82	-29.09	337	1.68	-23.64	1.75	-20.45	1.49	-32.27
海口	2005	3.37	3.15	3.11	3.07	-6.53	-7.72	-8.90							
	2006	3.54	3.29	3.22	3.10	-7.06	-9.04	-12.43							
	2007	2.98	2.70	2.71	2.65	-9.40	-9.06	-11.07							
	2008	2.99	2.79	2.78	2.72	-6.69	-7.02	-9.03							
	2009	2.73	2.50	2.53	2.53	-8.42	-7.33	-7.33							

注:1) η 为相对误差,为以月、季、年为尺度计算的碳化深度值分别与日累加碳化深度值之差除以日累加碳化深度值再乘以100%。

综上所述,在混凝土碳化深度计算中,对于无负温天数的地区,可直接以年均环境作用值作为混凝土碳化深度计算的环境作用代表值;对于存在负温天数的地区,可采用修正后的年均环境作用值(即去除气温小于 0℃ 后的环境作用值的平均值)作为有负温地区的环境作用代表值计算混凝土碳化深度,同时,碳化时长根据实际正温天数计算。

3 环境作用的时变规律

选用“年均”环境作用值作为混凝土碳化计算的环境作用代表值,研究以此时间尺度(年均尺度)表述的环境作用的变化规律后可准确进行混凝土碳化深度预测。

环境作用随时间的变化可看作一组时间序列,常用的预测环境作用时变规律的方法有经验预测方法、统计学预测方法以及基于非线性理论的预测方法。目前采用较多且应用较广的方法为统计学预测方法^[16]。

3.1 Holt-Winters 指数平滑模型

指数平滑法属于统计学预测方法,是时间序列预测法中使用最多的一种方法。该方法给近期的实测值以较大的权数、给远期的实际值以较小的权数,使预测值既能较多地反映最新的信息,又能反映大量历史资料的信息,从而使预测结果更符合实际。Holt-Winters 法是指平滑中的一种,它适用于对具有周期效应影响的线性增长趋势的序列进行预测。

Holt-Winters 指数平滑模型分无周期模型、周期加法模型、周期乘积模型 3 种^[17]。其中, Holt-Winters 周期指数平滑模型是把含有具有线性趋势、周期变动和随机变动的时间序列进行分解研究并与指数平滑法相结合分别对长期趋势 a_t 、趋势的增量 b_t 和周期变动 c_t 作出估计,然后建立预测模型,外推预测值。

以下简要介绍常用的 Holt-Winters 周期加法模型以及无周期模型计算式。Holt-Winters 周期加法模型计算式为

$$y'_{t+k} = a_t + b_t k + c_{t+k} \quad (5)$$

式中: y'_{t+k} 为第 $t+k$ 期时间序列的实际值, k 为向后平滑期数, a_t, b_t, c_t 为 3 个平滑方程,其递推公式为

$$a_t = \alpha(y_t - c_{t-L}) + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \quad (6)$$

$$b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1-\beta)b_{t-1} \quad (7)$$

$$c_t = \gamma(y_t - a_t) + (1-\gamma)c_{t-L} \quad (8)$$

式中: a_t 为具体为第 t 个从时间序列中剔除周期性变动后的长期趋势的指数平滑值; b_t 为第 t 个长期趋势变量的指数平滑值; c_t 为第 t 个周期性变动周期为 L 的指数平滑值, L 为周期长度; α, β, γ 为平滑系数,在 0~1 之间取值。

如果序列中不存在周期变动,可采用最简单的 Holt-Winters 无周期模型计算式为

$$a_t = \alpha y_t + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \quad (9)$$

$$b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1-\beta)b_{t-1} \quad (10)$$

相对于周期加法模型,无周期模型只估计 2 个平滑常数,一个用于平滑常数项 a_t ,一个用于平滑趋势系数 b_t 。

3.2 Holt-Winters 指数平滑模型计算实例

以长春、乌鲁木齐、拉萨、海口 4 个城市为例,将其在 1976—2005 年期间的年均气温、年均相对湿度看作一组时间序列,运用 Eviews 统计分析软件分别采用 Holt-Winters 无周期模型和周期加法模型预测 2006—2015 年的年均气温和年均相对湿度值。其中, α, β, γ 值选择系统自动给定,即系统按照预测误差平方和最小原则自动确定系数。图 6 绘出了 4 个城市年均气温、年均相对湿度实测值与预测值的比较图。从图中可以看出,相比 Holt-Winters 无周期模型,周期加法预测模型能较好地反映年均气温值、年均相对湿度的周期变动。

表 3 列出了采用 Holt-Winters 周期加法模型计算得到的年均环境作用值与实测值(2006—2009 年 4 年温度、湿度值)之间的对比情况,从表中可以看出,采用 Holt-Winters 方法可以较准确地描述环境作用的逐年变化规律。

将计算得到的年均环境作用值代入考虑环境作用变化的碳化深度计算式(2)~(4)即可获得在任意时段内混凝土碳化深度预测值。对于存在负温天数的地区,混凝土碳化深度计算要考虑年均环境作用及碳化时长的修正。

4 结论

(1)考虑环境作用变化的混凝土碳化深度计算分析结果表明,选取年均作用值或修正后的年均作用值(即去除负温天数后剩余天数环境作用的平均值)作为混凝土结构耐久性评估和设计的环境作用代表值具有一定的精度,且可在很大程度上简化一般大气环境下混凝土结构耐久性预测的计算工作量。

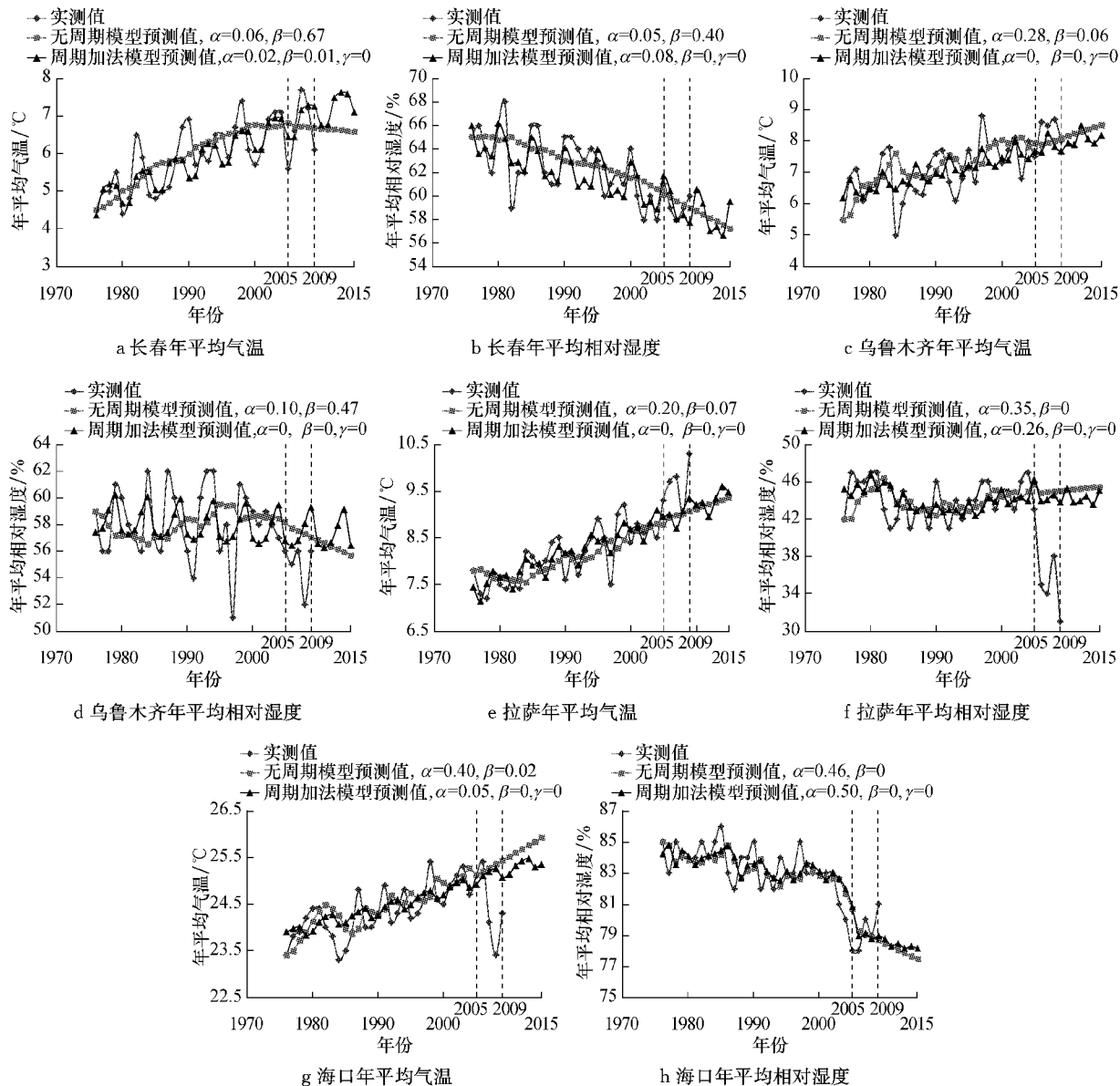


图6 实测值与预测值

Fig.6 The measured and predicted values

表3 年平均温度、相对湿度预测值与实测值对比

Tab.3 Comparison of predicted value with the measured value of annual temperature and relative humidity

年份 城市	2006 年				2007 年				2008 年				2009 年			
	实测		Holt - Winters		实测		Holt - Winters		实测		Holt - Winters		实测		Hol - Winters	
	T_y	R_{Hy}	T_y	R_{Hy}	T_y	R_{Hy}	T_y	R_{Hy}	T_y	R_{Hy}	T_y	R_{Hy}	T_y	R_{Hy}	T_y	R_{Hy}
长春	6.6	59	6.4	60.4	7.7	58	7.1	58.1	7.2	59	7.3	58.4	6.1	60	7.2	57.7
乌鲁木齐	8.6	55	7.6	56.4	8.5	56	8.2	56.8	8.7	52	7.8	58.1	8.0	56	7.7	59.3
拉萨	9.7	35	9.0	43.9	9.8	34	8.7	44.1	9.0	38	9.1	44.6	10.3	31	9.3	43.7
海口	25.4	78	25.1	78.9	24.1	80	25.2	79.1	23.4	79	25.2	78.8	24.3	81	25.1	78.9

注: T_y 为年平均温度; R_{Hy} 为年平均相对湿度。

(2) 采用 Holt-Winters 模型分析方法可较好地
对大气温度、相对湿度等环境作用序列进行准确
预测。

(3) 本文仅以一般大气环境下混凝土碳化为例

分析了环境作用的时间计算尺度,对海洋环境下混
凝土中氯离子侵蚀的预测如何确定合理的时间计算
尺度尚待深入研究。

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.
ZHANG Yu, JIANG Lixue, ZHANG Weiping, et al. Durability of concrete structures[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003.
- [2] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京:科学出版社, 2002.
JIN Weiliang, ZHAO Yuxi. Concrete structures durability[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [3] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京:科学技术出版社, 2003.
NIU Ditao. Durability and service life prediction for concrete structures [M]. Beijing: Science Technology Publishing House, 2003.
- [4] Steffens A, Dinkler D, Ahrens H. Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures[J]. Cement and Concrete Research, 2002,32: 935.
- [5] Meira G R, Andrade C, Padaratz I J, et al. Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone-Relationship between deposition of chloride on the wet candle vand chlorides accumulated into concrete [J]. Cement & Concrete Composites, 2007,29(2): 667.
- [6] 卢振永,金伟良,王海龙,等. 人工气候模拟加速试验的相似性设计[J]. 浙江大学学报:工学版, 2009,43(6): 1071.
LU Zhenyong, JIN Weiliang, WANG Hailong, et al. Similar design on accelerated test of artificial climate simulation[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2009,43(6): 1071.
- [7] American Concrete Institute committee 318. ACI 318-08 Buildings code requirements for structural concrete and commentary [S]. Washington: American Conerete Institute, 2007.
- [8] Standards Association of Australia Committee BD-002. AS3600-2009 Australian Standard for Concrete Structures[S]. Sydney: Standards Austratia, 2009.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.
The People's Republic of housing and rural construction. GB 50010—2002 Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Industry Press, 2002.
- [10] 中国工程建设标准化协会化工分会. GB 50046—2008 工业建筑防腐设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2008.
China Engineering Construction Standardization Association Chemical Branch. GB 50046—2008 Code for anticorrosion design of industrial constructions[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [11] 张海燕,把多铎,王正中. 混凝土碳化深度的预测模型[J]. 武汉大学学报:工学版, 2006,35(5): 42.
ZHANG Haiyan, BA Duoduo, WANG Zengzhong. A model for forecasting carbonization depth of concrete Engineering[J]. Journal of Wuhan University: Engineering Science, 2006, 35(5): 42.
- [12] 施惠生,王琼. 混凝土中氯离子迁移的影响因素研究[J]. 建筑材料学报, 2004,7(3): 286.
SHI Huisheng, WANG Qiong. Research on the factors influencing on the chloride ingressin in concrete[J]. Journal of Building Materials, 2004,7(3): 286.
- [13] 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.
XU Ning, GU Xianglin, HUANG Qinghua, et al. Study method of environmental action for concrete structures[J]. Structural Engineers, 2010,26(2): 162.
- [14] DOU X J, HUANG Q H, GU X L, et al. A practical model to predict carbonation depth of concrete [C]//Proceedings of International Conference on Durability of Concrete Structures. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008: 308-312.
- [15] 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(增刊1): 34.
XU Ning, GU Xianglin, HUANG Qinghua, et al. Environmental action for concrete structures on engineering environment scale [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011,37(Suppl.1): 34.
- [16] 王燕. 应用时间序列分析[M]. 北京:中国人民大学出版社, 2008.
WANG Yan. Application time series analysis[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2008.
- [17] 常军,李祯,李素萍. 温特斯法在夏季温度预测中的应用[J]. 气象科技, 2005,33(增刊): 105.
CHANG Jun, LI Zhen, LI Suping. Application of Winters method to summer temperature forecast [J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2005,33(Suppl.): 105.