

考虑地方气候时氯盐侵蚀混凝土结构寿命研究^{*}

焦俊婷¹, 叶英华², 杨荣华¹

(1. 厦门理工学院土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361021;

2. 北京航空航天大学土木工程系, 北京 100083)

摘要: 针对在气候环境和氯盐侵蚀共同作用下沿海混凝土结构诱导期寿命进行研究。基于现有混凝土结构氯盐寿命模型, 同时考虑气候环境温度、相对湿度影响, 分析了我国东南沿海部分城市混凝土结构诱导期寿命; 并利用简单可靠度理论计算我国东南沿海部分城市混凝土结构诱导期寿命的概率分布。研究结果表明: ① 地方气候相对湿度对诱导期寿命影响不容忽视; ② 对诱导期寿命影响较明显的因素有: 相对湿度影响系数 $f_{(h)}$ 、氯离子扩散延迟系数 m 、氯离子参考扩散系数 D_{ref} 和混凝土保护层厚度 X 。研究成果对混凝土结构加固、维护、剩余寿命预测具有参考作用。

关键词: 氯盐侵蚀环境; 混凝土结构; 温度; 相对湿度; 诱导期寿命

中图分类号: TU 528.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2016) 01-0085-06

The initiation time for reinforced concrete members under chlorine salt erosion and climate

JIAO Junting¹, YE Yinghua², YANG Ronghua¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. The department of Civil Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100083, China)

Abstract: The initiation time for reinforced concrete (RC) members were researched along coast under chlorine salt erosion and climate. Based existing chlorine erosion life model, as temperature and relative humidity were considered, the initiation time for RC members were calculated. Then the probability distribution of the initiation time was given for RC members along coast in southeast china by using simplified probability analysis. The results showed: ① The effect on initiation time from relative humidity should not be ignored; ② The factors, such as relative humidity influence coefficient $f_{(h)}$, chloride ion diffusion delay coefficient m , chloride ion diffusion reference coefficient D_{ref} , and concrete cover thickness X , had more obvious influence on initiation time. This would be useful for structure strengthening, maintenance, and remaining life prediction.

Key words: chlorine salt erosion; concrete structures; temperature; relative humidity; initiation time

沿海地区氯盐侵蚀作用下混凝土结构寿命由诱导期、发展期和失效期三部分组成^[1]。诱导期寿命 t_i 指混凝土内钢筋表面氯离子浓度达到临界氯离子浓度所需的时间。现有研究成果认为: 氯盐侵蚀混凝土结构诱导期寿命模型中氯离子扩散系数的

确定是关键因素, 氯离子扩散系数受时间、环境(温度、相对湿度)、混凝土材料性能等多个因素影响。

沿海、近海地区的混凝土结构直接或间接受海水侵蚀, 同时与海风、海雾、海潮中携带的氯离子

^{*} 收稿日期: 2015-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178020, 51478404); 福建省教育厅 A 类资助项目(JA14241)

作者简介: 焦俊婷(1968年生), 女; 研究方向: 钢筋混凝土结构非线性与耐久性; E-mail: jujiao@xmut.edu.cn

含量有关,与地方气候环境(温度、湿度等)有密切关系,其服役寿命远远低于设计寿命,沉重的重建与维修费造成巨大的经济损失^[2-7]。提高一定气候环境沿海地区混凝土结构耐久性、延长其使用寿命,是工程亟待解决的问题。但结合地方气候环境对氯盐侵蚀作用下混凝土结构寿命预测的相关文献研究较少^[8-10]。Allampallewar 等^[8]研究了印度沿海 5 个城市地方气候温度、相对湿度条件对氯离子侵蚀混凝土结构诱导期寿命的影响极其概率分布。Alhozaimy 等^[9]试验研究了海湾地区高温、高湿、氯离子侵蚀综合作用下混凝土的腐蚀,研究结果发现:当温度为 50 ℃、相对湿度为 85% 时,混凝土内钢筋的腐蚀低于温度为 40 ℃ 和 30 ℃、相对湿度为 85% 的腐蚀。应敬伟等^[10]结合我国广西地方气候环境研究了氯离子侵蚀混凝土结构中氯离子扩散系数的简化计算。可见结合地方气候温度和相对湿度环境,研究沿海混凝土结构 t_i 是必要的、有实际意义的。鉴于此,本文采用以月为时间单位,考虑月平均温度、月平均相对湿度对氯离子扩散系数的影响,计算我国东南沿海地区混凝土结构的 t_i ;并用简单概率方法,计算混凝土结构 t_i 的概率分布;最后对混凝土结构 t_i 影响因素进行敏感性分析,给出提高混凝土结构 t_i 的设计建议。研究结果为这些地区混凝土结构加固、维护、剩余寿命预测具有参考作用。

1 沿海氯盐腐蚀混凝土结构的 t_i

1.1 混凝土结构氯离子扩散模型

基于 Fick 第二定律:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

当边界条件 $C(0, t) = C_s$, $C(\infty, t) = C_0$; 初始条件 $C(x, 0) = C_0$; Fick 第二定律的解析解为:

$$C(x, t) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) \right] \quad (2)$$

式中, t 表示时间; x 表示混凝土结构内某处深度; $C(x, t)$ 表示 t 时刻混凝土结构内深度 x 处的氯离子浓度; C_s 、 C_0 分别表示混凝土结构表面和初始时刻内部氯离子浓度; erf 表示误差函数; D 表示氯离子扩散系数。

1.2 氯离子扩散系数

氯离子扩散系数 D 受时间、温度、相对湿度、混凝土材料性能(如水灰比、氯离子扩散延迟系数)等因素影响。计算 $C(x, t)$ 时采用氯离子有

效扩散系数 D_{eff} 来代替 D , 且:

$$D_{\text{eff}} = D_{\text{ref}} \cdot f_{(t)} \cdot f_{(T)} \cdot f_{(h)} \quad (3)$$

式中, D_{ref} 表示混凝土结构暴露于一定时间和一定湿度条件下氯离子的参考扩散系数; $f_{(t)}$ 表示时间 t 对氯离子扩散系数的影响系数; $f_{(T)}$ 表示环境温度 T 对氯离子扩散系数的影响系数; $f_{(h)}$ 表示环境相对湿度 h 对氯离子扩散系数的影响系数。

1.2.1 氯离子参考扩散系数 D_{ref} 文献 [11] 建议普通混凝土的 D_{ref} 为:

$$D_{\text{ref}} = D_{28} = 10^{[-12.06 + 2.4(w/c)]} \quad (4)$$

式中, D_{28} 表示混凝土结构暴露于 28 d、相对湿度为 100% 条件下氯离子的参考扩散系数, 单位: m^2/s ; w/c 表示混凝土材料的水灰比。

1.2.2 时间影响系数 $f_{(t)}$ 文献 [12] 给出时间 t 影响氯离子扩散的函数 $D_{(t)}$:

$$D_{(t)} = D_{\text{ref}} \left(\frac{t_{\text{ref}}}{t} \right)^m = D_{\text{ref}} \cdot f_{(t)}, \quad f_{(t)} = \left(\frac{t_{\text{ref}}}{t} \right)^m \quad (5)$$

式中, t_{ref} 表示混凝土龄期, $t_{\text{ref}} = 28 \text{ d}$; m 表示氯离子扩散系数延迟。

1.2.3 温度影响系数 $f_{(T)}$ 文献 [11] 给出温度 T 影响氯离子扩散的函数 $D_{(T)}$:

$$D_{(T)} = D_{\text{ref}} \cdot \exp\left[\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T}\right)\right] = D_{\text{ref}} \cdot f_{(T)}, \quad f_{(T)} = \exp\left[\frac{U}{R}\left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (6)$$

式中, T_{ref} 表示混凝土养护时的标准温度 293 K, 即 20 ℃; T 表示混凝土环境温度; U 表示混凝土扩散过程的激活能常数, $U = 35\,000 \text{ J/mol}$; R 表示气体常数, $R = 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ 。

1.2.4 相对湿度影响系数 $f_{(h)}$ 文献 [13] 给出环境相对湿度 h 影响氯离子扩散的函数 $D_{(h)}$:

$$D_{(h)} = D_{\text{ref}} \left[1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c} \right) \right]^{-1} = D_{\text{ref}} \cdot f_{(h)}, \quad f_{(h)} = \left[1 + \left(\frac{1-h}{1-h_c} \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

式中, h_c 表示混凝土所处环境临界相对湿度, $h_c = 75\%$; h 混凝土结构所处环境实际相对湿度。

1.3 混凝土结构 t_i 计算

1.3.1 t_i 的计算公式 依据 t_i 的定义知: 当混凝土结构钢筋保护层厚度为 X , 则 $C(X, t_i) = C_{\text{th}}$ 。其中, t_i 表示混凝土为第 i 个月龄期, 即:

$$t_i = i \times (365/12) = i \times 30.417 \text{ (d)}$$

依据式 (2) 可得^[8]:

$$C(X,t_i) = C(X,t_{i-1}) \Big|_{i>1} + (C_s - C_0) [\operatorname{erf}_{(i-1)} - \operatorname{erf}_{(i)}] \tag{8}$$

其中，

$$\operatorname{erf}_{(i-1)} = \operatorname{erf}\left(\frac{X}{\sqrt{4D_{\text{eff},i}[(i-1)30.417 - t_{\text{ref}}]}}\right) \tag{9}$$

$$\operatorname{erf}_{(i)} = \operatorname{erf}\left(\frac{X}{\sqrt{4D_{\text{eff},i}(i30.417 - t_{\text{ref}})}}\right) \tag{10}$$

式中， $D_{\text{eff},i}$ 表示第*i*个月氯离子的有效扩散系数。
当*i*=1时， $C(X,t_1)$ 为

$$C(X,t_1) = C_0 + (C_s - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{X}{\sqrt{4D_{\text{eff},1}(30.417 - t_{\text{ref}})}}\right)\right] \tag{11}$$

1.3.2 t_i 的计算过程

1) 首先计算*i*=1时，由式(3) - (7)计算氯离子有效扩散系数 $D_{\text{eff},1}$ ；由式(11)计算 $C(X,t_1)$ 。
2) 然后分别计算*i*=2、3…时，由式(3) - (7)计算氯离子有效扩散系数 $D_{\text{eff},i}$ ；按式(8) - (10)，计算 $C(X,t_i)$ ；直到 $C(X,t_i) \geq C_{\text{th}}$ 停止，此时的 t_i 即为混凝土结构诱导期寿命。

1.3.3 t_i 计算算例 以我国东南沿海海口、深圳、厦门、温州和宁波等5城市混凝土结构为例，当考虑地方气候温度、相对湿度时计算各城市混凝土结构的 t_i 。假定混凝土材料水灰比为0.5、 $m = 0.52$ ；钢筋保护层厚度 $X = 50\text{ mm}$ ；氯离子临界值 $C_{\text{th}} = 0.037\%$ 、混凝土结构表面氯离子浓度 $C_s = 0.5\%$ 、混凝土结构氯离子初始含量 $C_0 = 0$ 。5个城市月平均温度见表1、月平均相对湿度见表2，表1、表2数据取自文献[14]。

表1 我国东南沿海5城市月平均温度¹⁾

Table 1 The monthly average temperature of five cities in southeast China

	cities in southeast China				℃
月份	A	B	C	D	E
1	17.7	15.4	12.5	8.0	4.9
2	18.7	16.3	12.4	8.5	6.0
3	21.8	19.0	14.6	11.4	9.5
4	25.2	22.7	18.7	16.3	15.2
5	27.4	26.0	22.6	20.8	20.2
6	28.5	28.0	25.8	24.6	24.0
7	28.6	28.9	27.8	28.0	28.1
8	28.1	28.7	27.6	28.0	27.8
9	27.2	27.7	26.0	24.9	23.7
10	25.3	25.3	23.0	20.4	18.7
11	22.3	21.2	19.2	15.5	13.0
12	19.0	17.0	14.6	10.4	7.2

1) A—海口,B—深圳,C—厦门,D—温州,E—宁波

表2 我国东南沿海5城市月平均相对湿度¹⁾

Table 2 The monthly average relative humidity of five cities in southeast China

	cities in southeast China				%
月份	A	B	C	D	E
1	86	71.7	75	76	76
2	88	76.8	79	79	78
3	86	79.5	83	82	80
4	85	81.0	82	83	81
5	84	81.7	84	84	82
6	83	81.8	85	88	86
7	82	80.5	82	84	83
8	85	81.8	82	82	83
9	85	78.8	78	81	83
10	83	72.2	71	77	80
11	80	68.4	70	74	77
12	81	67.1	70	72	75

1) A—海口,B—深圳,C—厦门,D—温州,E—宁波

由式(4)计算得： $D_{\text{ref}} = 1.198\text{ mm}^2/\text{d}$ ；由式(6)计算得 $f_{(T)}$ 见表3；由式(7)计算得 $f_{(h)}$ 见表4。

最后计算得到海口、深圳、厦门、温州和宁波5城市混凝土结构的 t_i 分别是：6.46、11.33、12.42、11.67和12.58年。计算结果表明：①地方气候环境的温度、相对湿度对混凝土结构的 t_i 有一定影响；②海口的 t_i 明显小于其它城市的 t_i ；③深圳和温州的 t_i 相接近，厦门和宁波的 t_i 相接近。可见，考虑地方气候的温度、相对湿度环境研究混凝土结构的 t_i 是十分有必要的。

表3 月平均温度影响系数 $f_{(T)}$ ¹⁾

Table 3 The influence coefficient $f_{(T)}$ of monthly average temperature

月份	A	B	C	D	E
1	0.89	0.80	0.69	0.54	0.46
2	0.94	0.83	0.68	0.56	0.49
3	1.09	0.95	0.76	0.65	0.59
4	1.28	1.14	0.94	0.83	0.79
5	1.42	1.33	1.13	1.04	1.01
6	1.50	1.47	1.32	1.25	1.21
7	1.51	1.53	1.45	1.47	1.47
8	1.47	1.51	1.44	1.47	1.45
9	1.41	1.44	1.33	1.27	1.20
10	1.29	1.29	1.16	1.02	0.94
11	1.12	1.06	0.96	0.80	0.70
12	0.95	0.86	0.76	0.61	0.52
均值	1.24	1.18	1.05	0.96	0.90

1) A—海口,B—深圳,C—厦门,D—温州,E—宁波

表 4 月平均相对湿度影响系数 $f_{(h)}^{(1)}$
Table 4 The influence coefficient $f_{(h)}$ of monthly
average relative humidity

月份	A	B	C	D	E
1	0.91	0.38	0.50	0.54	0.54
2	0.95	0.57	0.67	0.67	0.63
3	0.91	0.69	0.82	0.79	0.71
4	0.89	0.75	0.79	0.82	0.75
5	0.86	0.78	0.86	0.86	0.79
6	0.82	0.78	0.89	0.95	0.91
7	0.79	0.73	0.79	0.86	0.82
8	0.89	0.78	0.79	0.79	0.82
9	0.89	0.66	0.63	0.75	0.82
10	0.82	0.40	0.36	0.58	0.71
11	0.71	0.28	0.33	0.46	0.58
12	0.75	0.25	0.33	0.39	0.50
均值	0.85	0.59	0.64	0.70	0.72

1) A—海口,B—深圳,C—厦门,D—温州,E—宁波

2 基于可靠度的沿海混凝土结构 t_i 分析

2.1 沿海混凝土结构 t_i 的概率密度函数

文献 [15] 建议：① 混凝土结构 t_i 的概率密度函数服从对数分布函数，如式（12）所示，其中 $a = \ln(t_i)$ ，

$$f_{(t_i)} = \frac{\exp\left\{-\frac{[\ln(t) - a]^2}{2\sigma^2}\right\}}{t\sigma\sqrt{2\pi}}, \quad t > 0 \quad (12)$$

σ 是 t_i 的标准方差；② 用随机变量均值计算概率分布时的概率为 50%；③ t_i 是随机变量 D_{ref} 、 m 、 $f_{(T)}$ 、 $f_{(h)}$ 、 X 、 C_s 、 C_{th} 和 C_0 的函数，即：

$$t_i = f(D_{\text{ref}}, m, f_{(T)}, f_{(h)}, X, C_s, C_{th}, C_0) \quad (13)$$

对式（13）在随机变量为均值时线性化得：

$$\begin{aligned} t_i = \bar{t}_i + & \frac{\partial t_i}{\partial D_{\text{ref}}} \bigg|_m (\Delta D_{\text{ref}}) + \frac{\partial t_i}{\partial m} \bigg|_m (\Delta m) + \\ & \frac{\partial t_i}{\partial f_{(T)}} \bigg|_m (\Delta f_{(T)}) + \frac{\partial t_i}{\partial f_{(h)}} \bigg|_m (\Delta f_{(h)}) + \\ & \frac{\partial t_i}{\partial X} \bigg|_m (\Delta X) + \frac{\partial t_i}{\partial C_s} \bigg|_m (\Delta C_s) + \\ & \frac{\partial t_i}{\partial C_{th}} \bigg|_m (\Delta C_{th}) + \frac{\partial t_i}{\partial C_0} \bigg|_m (\Delta C_0) \end{aligned} \quad (14)$$

式中， $\bar{t}_i$ 表示随机变量为均值时的诱导期寿命。

对式（13）在随机变量为均值时计算 t_i 的方差得：

$$\sigma_{t_i}^2 = \left(\frac{\partial t_i}{\partial D_{\text{ref}}} \bigg|_m\right)^2 (\sigma_{D_{\text{ref}}})^2 + \left(\frac{\partial t_i}{\partial m} \bigg|_m\right)^2 (\sigma_m)^2 +$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial t_i}{\partial f_{(T)}} \bigg|_m\right)^2 (\sigma_{f_{(T)}})^2 + \left(\frac{\partial t_i}{\partial f_{(h)}} \bigg|_m\right)^2 (\sigma_{f_{(h)}})^2 + \\ & \left(\frac{\partial t_i}{\partial X} \bigg|_m\right)^2 (\sigma_X)^2 + \left(\frac{\partial t_i}{\partial C_s} \bigg|_m\right)^2 (\sigma_{C_s})^2 + \\ & \left(\frac{\partial t_i}{\partial C_{th}} \bigg|_m\right)^2 (\sigma_{C_{th}})^2 + \left(\frac{\partial t_i}{\partial C_0} \bigg|_m\right)^2 (\sigma_{C_0})^2 \end{aligned} \quad (15)$$

2.2 我国东南沿海混凝土结构 t_i 的概率分布

以我国东南沿海海口、深圳、厦门、温州和宁波等 5 城市为例计算混凝土结构 t_i 的概率分布。设随机变量 D_{ref} 、 m 、 $f_{(T)}$ 、 $f_{(h)}$ 、 X 、 C_s 、 C_{th} 和 C_0 的变异系数为 0.2、0.1、0.07、0.22、0.083、0.25、0.2 和 0.0（因一般混凝土 $C_0 = 0.0$ ，故假设 C_0 的变异系数为 0.0）。其它参数同前，计算结果见表 5－表 9。

表 5 海口 t_i 概率特征值计算
Table 5 The probabilistic characteristic value
calculation of t_i in Haikou City

随机变量	均值	增量	t_i	偏导数	变异系数	偏差
D_{ref}	1.193	0.119 3	5.37	-1.549	0.20	0.137
m	0.524	0.052 4	9.73	7.817	0.10	0.168
$f_{(T)}$	1.240	0.124 0	5.45	-1.371	0.07	0.014
$f_{(h)}$	0.850	0.085 0	4.53	-4.175	0.22	0.610
X	50.000	5.000 0	9.48	0.077	0.08	0.101
C_s	0.500	0.050 0	5.87	-1.916	0.25	0.057
C_{th}	0.037	0.003 7	6.88	17.024	0.20	0.016
C_0	-	-	-	-	-	-
方差						1.103
$a = \ln(6.46) = 1.866$						$\sigma = 1.050$

表 6 深圳 t_i 概率特征值计算
Table 6 The probabilistic characteristic value
calculation of t_i in Shenzhen City

随机变量	均值	增量	t_i	偏导数	变异系数	偏差
D_{ref}	1.193	0.119 3	9.33	-1.628	0.20	0.151
m	0.524	0.052 4	17.75	8.567	0.10	0.202
$f_{(T)}$	1.180	0.118 0	9.50	-1.493	0.07	0.015
$f_{(h)}$	0.640	0.064 0	9.50	-2.753	0.22	0.150
X	50.000	5.000 0	16.50	0.075	0.08	0.097
C_s	0.500	0.050 0	10.33	-1.848	0.25	0.053
C_{th}	0.037	0.003 7	12.25	21.101	0.20	0.024
C_0	-	-	-	-	-	-
方差						0.693
$a = \ln(11.33) = 2.427$						$\sigma = 0.832$

表 7 厦门 t_i 概率特征值计算

Table 7 The probabilistic characteristic value calculation of t_i in Xiamen City						
随机变量	均值	增量	t_i	偏导数	变异系数	偏差
D_{ref}	1.193	0.119 3	9.42	-2.317	0.20	0.306
m	0.524	0.052 4	17.75	6.814	0.10	0.128
$f_{(T)}$	1.050	0.105 0	11.67	-0.593	0.07	0.002
$f_{(h)}$	0.640	0.064 0	10.50	-2.624	0.22	0.136
X	50.000	5.000 0	16.50	0.057	0.08	0.056
C_s	0.500	0.050 0	10.33	-3.685	0.25	0.212
C_{th}	0.037	0.003 7	12.33	-1.966	0.20	0.000 2
C_0	-	-	-	-	-	-
方差						0.840
$a = \ln(12.42) = 2.519$				$\sigma = 0.916$		

表 8 温州 t_i 概率特征值计算

Table 8 The probabilistic characteristic value calculation of t_i in Wenzhou City						
随机变量	均值	增量	t_i	偏导数	变异系数	偏差
D_{ref}	1.193	0.119 3	9.67	-1.576	0.20	0.141
m	0.524	0.052 4	19.33	9.630	0.10	0.255
$f_{(T)}$	0.960	0.096 0	10.17	-1.433	0.07	0.009
$f_{(h)}$	0.700	0.070 0	9.83	-2.451	0.22	0.142
X	50.000	5.000 0	17.50	0.081	0.08	0.113
C_s	0.500	0.050 0	10.67	-1.792	0.25	0.050
C_{th}	0.037	0.003 7	12.83	25.612	0.20	0.036
C_0	-	-	-	-	-	-
方差						0.747
$a = \ln(11.67) = 2.457$				$\sigma = 0.864$		

表 9 宁波 t_i 概率特征值计算

Table 9 The probabilistic characteristic value calculation of t_i in Ningbo City						
随机变量	均值	增量	t_i	偏导数	变异系数	偏差
D_{ref}	1.193	0.119 3	10.50	-1.515	0.20	0.131
m	0.524	0.052 4	20.58	9.393	0.10	0.242
$f_{(T)}$	1.050	0.105 0	10.67	-1.568	0.07	0.013
$f_{(h)}$	0.640	0.064 0	10.58	-2.705	0.22	0.145
X	50.000	5.000 0	18.58	0.078	0.08	0.105
C_s	0.500	0.050 0	11.58	-1.657	0.25	0.043
C_{th}	0.037	0.003 7	13.75	24.035	0.20	0.032
C_0	-	-	-	-	-	-
方差						0.711
$a = \ln(12.58) = 2.532$				$\sigma = 0.843$		

2.2.1 混凝土结构 t_i 的概率密度函数 5 个城市混凝土结构 t_i 的概率密度函数如图 1 所示。由图 1

可知，海口 t_i 的概率密度函数与其他 4 城市不同；其他 4 城市 t_i 的概率密度函数也略有差异。

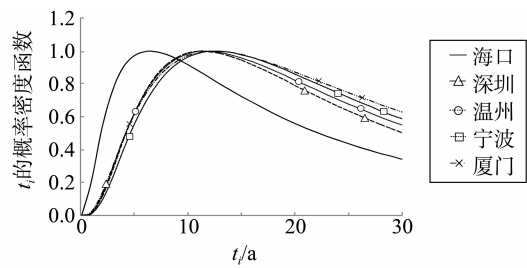


图 1 5 个城市 t_i 概率密度函数
Fig. 1 The probability density function at five cities

2.2.2 混凝土结构 t_i 的概率分布函数 5 个城市混凝土结构 t_i 的概率分布函数如图 2 所示。由图 2 可知，海口 t_i 的概率分布函数与其他 4 城市差异明显；其他 4 城市 t_i 的概率分布函数略有差异。建议研究各地沿海混凝土结构 t_i 宜考虑地区气候温度、相对湿度的影响。

图 1 和图 2 表明环境相对湿度、温度对氯离子的扩散有不可忽视影响，海口相对湿度影响系数和温度影响系数均高于其他 4 城市，其概率密度函数、概率分布函数均与其它 4 常识有明显差异。

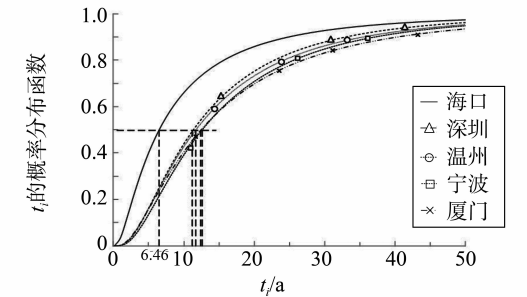


图 2 5 个城市 t_i 概率分布函数
Fig. 2 The probability distribution function at five cities

3 混凝土结构 t_i 敏感因素分析

3.1 敏感因素分析 为了解混凝土结构 t_i 对各影响因素的敏感程度，进行因素方差分析^[16]。基于表 5 - 表 9 计算，各因素对 t_i 影响的方差及敏感性分析结果如表 10 所示。由表 10 可知，① 不同城市 t_i 对各影响因素的敏感程度不同。② 相对湿度对 5 个城市 t_i 的影响均在前 3 名，表明该因素的影响不容忽视。③ 温度对 5 个城市 t_i 的影响排列均较靠后，表明该因素的影响不明显。④ 对 t_i 的影响较明显因素有： $f_{(h)}$ 、 m 、 D_{ref} 和 X 。

3.2 提高混凝土 t_i 措施

综合前述分析，建议提高凝土结构 t_i 的主要措施：① 从材料配比以及制备方面，注意采用适当的水灰比、养护条件，以便混凝土结构具有较好

的 D_{ref} 和 m ；② 由于保护层厚度对 t_i 有明显的影响效果，选择合适的保护层厚度 X ；③ 考虑相对湿度的影响系数 $f_{(h)}$ 对 t_i 有明显的影响，建议在设计混凝土结构耐久性寿命时应合理的考虑该因素的影响。

表 10 各因素对 t_i 影响方差及敏感性分析¹⁾
Table 10 The variance and sensitivity of t_i form the influence factors

误差因素	海口			深圳			厦门			温州			宁波		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
D_{ref}	0.137	12.42	③	0.151	21.82	②	0.306	36.42	①	0.141	18.90	③	0.131	18.43	③
m	0.168	15.23	②	0.202	29.19	①	0.128	15.23	④	0.255	34.18	①	0.242	34.04	①
$f_{(T)}$	0.014	1.27	⑦	0.015	2.17	⑦	0.002	0.24	⑥	0.009	1.21	⑦	0.013	1.83	⑦
$f_{(h)}$	0.610	55.30	①	0.150	21.68	③	0.136	16.19	③	0.142	19.03	②	0.145	20.39	②
X	0.101	9.16	④	0.097	14.02	④	0.056	6.67	⑤	0.113	15.15	④	0.105	14.77	④
C_s	0.057	5.17	⑤	0.053	7.66	⑤	0.212	25.23	②	0.050	6.70	⑤	0.043	6.05	⑤
C_{th}	0.016	1.45	⑥	0.024	3.47	⑥	0.0002	0.02	⑦	0.036	4.83	⑥	0.032	4.50	⑥
C_0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
偏差和	1.103	100.0		0.692	100.0		0.840	100.00		0.746	100.0		0.711	100.0	

1) I 为偏差；II 为 $\frac{\text{偏差}}{\text{偏差和}} \times 100$ ；III 为各因素对 t_i 的影响次序

4 结 语

本文结合地方气候温度和湿度环境，研究沿海混凝土结构的 t_i 。计算了我国东南沿海 5 个城市混凝土结构的 t_i 、其概率分布及其敏感性因素。研究结果表明：① 相对湿度对 5 个城市 t_i 的影响不容忽视；② 温度对 5 个城市 t_i 的影响均排列较靠后，表面明该因素的影响不明显；③ 对 t_i 的影响较明显的因素有： $f_{(h)}$ 、 m 、 D_{ref} 和 X ；并给出提高混凝土 t_i 技术措施。

参考文献：

[1] 余红发,孙伟,鄢良慧,麻海燕. 混凝土使用寿命预测方法的研究 I[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30 (6): 686 – 689.

[2] MEHTA P K. Concrete in the marine environment [M]. London and New York: Elsevier Applied Science, 2003.

[3] 马孝轩,仇新刚,陈从庆. 钢筋混凝土在滨海盐土地区腐蚀规律试验研究[J]. 建筑科学, 2001, 17(6): 41 – 43.

[4] 张誉,蒋利学,张伟平. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003.

[5] 徐强,俞海勇. 大型海工混凝土结构耐久性研究与实践[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[6] 张玉敏,徐新生. 海水侵蚀环境下混凝土耐久性的研究(英文) [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(S): 132 – 33.

[7] 高嵩,李欧义,陈建珍. 再生骨料混凝土耐久性能影响因素研究(英文) [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(S2): 20 – 22.

[8] ALLAMPALLEWAR S B, SRIVIDYA A. Corrosion initiation time for reinforced concrete members along Indian coast: Effects of temperature and relative humidity-a probabilistic approach [J]. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 2008, 15(6): 539 – 533.

[9] ALHOZAIMY A, HUSSAIN R R, AL-ZAID R, et al. Coupled effect of ambient high relative humidity and varying temperature marine environment on corrosion of reinforced concrete [J]. Construction & Building Materials, 2012, 28 (1):670 – 679.

[10] 应敬伟,赵治超,张喜德. 地方气候环境下氯离子扩散系数的研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2008, 33 (S): 32 – 37.

[11] THOMAS M P A, BENTZ E C. Life-365: Computer program for predicting the service life and life cycle costs of reinforced concrete exposed to chlorides [M]. Fairfax, USA: Silica Fume Association, 2001.

[12] MANGAT P S, MOLLOY B T. Prediction of long term chloride concentration in concrete [J]. Materials & Structures, 1994, 27 (6): 338 – 346.

[13] BAZABT Z P, NAJJAR L J. Nonlinear water diffusion in ono-saturated concrete [J]. Materials and Constructions, 1972, 5 (25): 3 – 20.

[14] 维基百科基金会. 维基百科:自由的百科全书[EB/OL]. (2014 – 10 – 16) [2015 – 02 – 05]. <http://zh.wikipedia.org/wiki/>.

[15] BENTZ E C. Probabilistic modeling of service life for structures subjected to chlorides [J]. ACI Materials Journal, 2003, 100 (5): 391 – 397.

[16] 袁志发,周静芊. 试验设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.