

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.013

受力状态下混凝土材料劣化模型与可靠性分析

李英民^{a,b}, 周小龙^a, 谭潜^a

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:通过分析试验数据,修正和改进了现有混凝土碳化深度预测模型中的应力影响系数和水灰比影响系数,并给出了基于可靠性分析的混凝土结构材料劣化寿命准则。分析表明:拉、压应力状态下,混凝土碳化速率分别得到促进和抑制,特别是随着拉应力水平的提高,碳化速率越来越快;通过可靠性分析可得,混凝土材料劣化概率与可靠度存在一一对应的关系,同时混凝土保护层厚度和应力水平对混凝土结构的寿命影响显著,在具有相同可靠度保障时,随着拉应力水平的提高或保护层厚度的减小,混凝土材料的劣化时间将缩短。

关键词:碳化;应力水平;劣化模型;可靠度;混凝土结构

中图分类号:TU312 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)06-0082-07

Deterioration Model and Reliability Analysis on Concrete Material at Stress States

Li Yingmin^{a,b}, Zhou Xiaolong^a, Tan Qian^a

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction
of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: According to the analysis of existing test data, the stress influence coefficient and water-cement ratio influence coefficient in the existing concrete carbonation depth forecasting models are modified and improved. Based on the reliability analysis, the rule of deterioration life is presented. The analysis shows that the rate of carbonation of concrete is accelerated or restricted at the status of tensile or compressive stress, respectively. Especially with the increase of the level of tensile stress, the carbonation rate of concrete will become faster and faster. According to the results of reliability analysis, the relation between probability and reliability of the concrete deterioration is one-to-one corresponsive, meanwhile, the concrete cover thicknesses and stress levels have great influences on the durability life of concrete structures. And with the same reliability, the time of deterioration of concrete decreases with a higher stress levels and a less cover thickness.

Key words: carbonation; stress level; deterioration model; reliability; concrete structures

碳化深度是一般大气环境下衡量混凝土结构材料劣化的主要量化指标。调查显示,大量在役混凝土结构存在着过早劣化的迹象,这种现象的产生往往与结构工程师设计时较少关注混凝土材料的耐久

性有关。目前,关于混凝土碳化深度的研究很多^[1-5],但不管是基于碳化机理的理论模型还是基于碳化试验的经验模型都较少系统考虑应力因素的影响,即使考虑^[6],也统一规定拉应力影响系数取

收稿日期:2013-04-25

基金项目:国家科技支撑计划(2009BAJ28B01-02);中央高校基本科研业务费(CDJXS11201167);重庆市科技攻关计划(2011GGB127)。

作者简介:李英民(1968-),男,教授,博士生导师,主要从事地震工程与工程抗震、抗震鉴定与加固等研究,(E-mail) liyingmin@cqu.edu.cn。

1.1,压应力影响系数取 1.0,使得拉应力状态下的预测结果偏于不安全而压应力状态下的预测结果偏于保守。同时现有碳化深度预测模型没有考虑应力因素和水灰比因素间的相互影响,而水灰比和应力状态的不同直接关系到混凝土内部孔隙率的大小,二者对混凝土的碳化速度影响极大^[7-8],且二者相互关联。鉴于此,系统考虑水灰比和应力因素的影响对完善混凝土碳化深度预测模型很有必要。

文章以混凝土碳化深度达到钢筋表面一定距离时的状态作为混凝土构件耐久性失效的极限状态,通过对混凝土碳化深度的分析来研究混凝土材料的劣化模型,同时考虑到碳化深度预测模型是基于试验平均数据的数学回归未考虑混凝土碳化过程的随机性,采用可靠度理论,给出了混凝土结构材料劣化预测的概率方法。

1 混凝土碳化深度预测模型改进

1.1 现有混凝土碳化深度试验方案与检测数据

综合考虑已有研究成果^[9-12],同时考虑到实际

工程中较少有混凝土构件承受轴向拉力作用,大部分受拉构件都处于弯曲受拉状态。文献[12]中的试验方案能较真实的反映实际工程中混凝土构件所处的应力状态,也能更准确地反映拉压应力条件下混凝土碳化深度随时间的演变规律。试件加载方式如图 1 所示。拉、压应力区的应力值可通过圣维南原理确定。

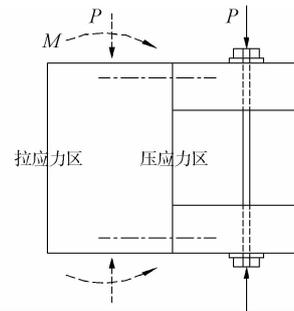


图 1 混凝土碳化试验加载示意图

试验条件和试件配制详见文献[12]。试验检测数据如表 1 所示。

表 1 试验室不同应力和水灰比条件下混凝土试件的碳化深度

mm

水灰比	应力水平	混凝土构件碳化时间/d							
		6	12	24	31	45	62	69	76
0.40	-0.054	3.0	5.8	11.0	13.4	16.2	18.4	19.3	20.0
	-0.027	2.9	5.6	10.6	13.0	15.6	17.9	18.7	19.3
	-0.019	2.8	5.3	10.2	12.5	15.0	17.1	18.0	18.5
	-0.008	2.7	5.2	9.9	12.1	14.5	16.7	17.4	18.0
	0	3.0	5.8	11.0	13.8	16.2	18.5	19.4	20.0
	0.103	3.1	5.9	11.2	13.6	16.5	19.0	20.0	20.5
	0.248	3.4	6.5	12.4	15.1	18.4	21.2	22.1	22.8
	0.352	3.6	7.0	13.4	16.2	19.5	22.5	23.3	23.9
0.48	0.703	4.1	7.9	15.0	18.3	22.0	25.4	26.4	27.3
	-0.054	4.3	8.2	15.8	19.2	23.5	26.5	27.8	28.6
	-0.027	3.8	7.3	13.9	17.0	20.6	23.2	24.5	25.4
	-0.019	3.6	6.9	13.2	16.1	19.4	22.2	23.3	24.0
	-0.008	3.2	6.1	11.7	14.3	17.4	20.0	20.8	21.4
	0	3.2	6.1	11.9	14.3	17.2	19.8	20.7	21.3
	0.103	3.1	5.9	11.4	13.8	16.7	19.1	20.0	20.6
	0.248	3.0	5.7	11.0	13.3	16.1	18.3	19.3	20.0
0.352	2.9	5.5	10.6	12.9	15.5	17.7	18.5	19.2	
	0.703	2.8	5.4	10.3	12.5	15.1	17.3	18.1	18.6

续表 1

水灰比	应力水平	混凝土构件碳化时间/d							
		6	12	24	31	45	62	69	76
0.55	-0.054	4.5	8.6	16.5	20.1	24.3	27.8	29.1	30.0
	-0.027	4.0	7.6	14.7	17.8	21.3	24.7	25.8	26.5
	-0.019	3.7	7.2	13.6	16.6	19.9	22.5	23.9	24.8
	-0.008	3.4	6.6	12.5	15.2	18.3	21.1	22.0	22.6
	0	3.4	6.5	12.5	15.2	18.0	21.0	21.6	22.6
	0.103	3.3	6.3	12.1	14.7	17.8	20.4	21.3	22.0
	0.248	3.2	6.1	11.7	14.2	17.0	19.6	20.6	21.2
	0.352	3.1	5.8	11.3	13.6	16.5	18.8	19.7	20.4
0.703	2.9	5.5	10.5	13.0	15.5	17.8	18.7	19.2	

1.2 混凝土材料碳化深度预测模型

目前已有的混凝土碳化深度预测模型主要可以归结为 3 种类型:基于扩散理论的预测模型、基于碳化试验的经验模型和基于综合考虑扩散理论和碳化试验结果的预测模型。虽然各种预测模型的差异较大,但都有一个共同点,即都认为混凝土碳化深度与其龄期的平方根成正比。考虑到这些预测模型均没有系统考虑混凝土受力状态不同对碳化深度的影响,而实际上混凝土碳化点的应力状态对该处碳化深度的影响是显著的。文献[12]确定的预测模型虽然较系统的考虑了应力因素的影响,但混凝土碳化深度的影响因素很多,随机性也很大,特别是混凝土结构服役时间跨度大,各种影响因素具有很强的个性和不确定性,该文献仅以应力水平和水灰比作为混凝土碳化深度的影响因素显然是不够的。为寻找更适合考虑应力因素的碳化深度预测模型,基于文献[12]中试验数据,选用多条曲线对碳化深度和碳化时间的关系进行数学回归,经多次试算,得到 2 种较合理的关系曲线回归方程,如图 2~5 所示。

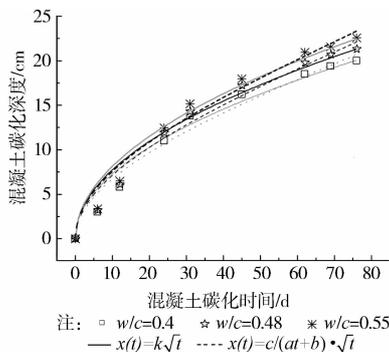


图 2 $\sigma/\sigma_c = 0$ 时 $X(t)-t$ 关系曲线公式拟合

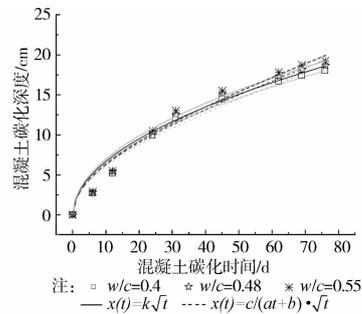


图 3 $\sigma/\sigma_c = 0.05$ (压) 时 $X(t)-t$ 关系曲线公式拟合

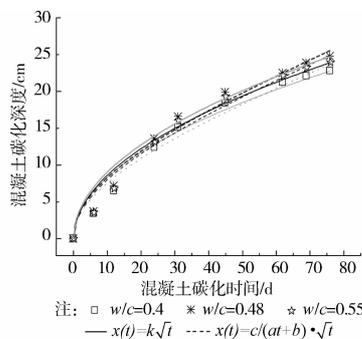


图 4 $\sigma/\sigma_c = 0.25$ (拉) 时 $X(t)-t$ 关系曲线公式拟合

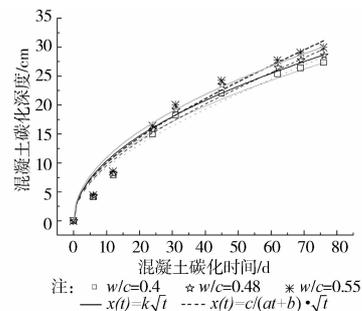


图 5 $\sigma/\sigma_c = 0.7$ (拉) 时 $X(t)-t$ 关系曲线公式拟合

图 2~5 给出了在不同条件下根据试验数据拟

合的 2 种混凝土碳化深度随时间变化的关系式,其中拟合公式为 $x(t) = k\sqrt{t}$ 时,参数 k 与真实值的相

关系数为分别为(0.970, 0.970, 0.971), (0.971, 0.971, 0.970), (0.970, 0.971, 0.972), (0.971, 0.970, 0.970), 大于拟合公式为 $x(t) = c/(at+b)\sqrt{t}$ 时的参数 a, b, c 的相关系数(0.966, 0.968, 0.968), (0.968, 0.968, 0.968), (0.969, 0.968, 0.969), (0.969, 0.966, 0.968)。可见式 $x(t) = k\sqrt{t}$ 能更准

切的反映混凝土碳化深度的变化趋势。考虑到碳化深度为 $x(t) = k\sqrt{t}$ 的预测公式具有一定的理论依据, 选用形如 $x(t) = k\sqrt{t}$ 的预测模型来修正和改进考虑应力因素和水灰比因素的碳化系数 k 值。表2给出了混凝土碳化预测公式为 $x(t) = k\sqrt{t}$ 时公式中的 k 值。

表2 基于试验数据的混凝土碳化模型碳化系数值 k

水灰比	应力水平 (σ/σ_c)				0 应力	应力水平 (σ/σ_t)			
	-0.054	-0.027	-0.019	-0.008	0.000	0.103	0.248	0.352	0.703
$w/c=0.40$	2.063	2.126	2.215	2.290	2.302	2.350	2.610	2.765	3.131
$w/c=0.48$	2.140	2.198	2.282	2.366	2.448	2.460	2.753	2.902	3.292
$w/c=0.55$	2.206	2.335	2.430	2.522	2.582	2.602	2.826	3.046	3.442

1.2.1 初始模型选定和改进 影响混凝土碳化的因素很多, 有外部环境因素, 也有混凝土内部材料性质本身的影响因素。为了更精确的给出碳化深度的预测模型, 需要尽可能多的考虑这些不确定因素的影响。考虑到目前中国对混凝土碳化因素研究最全面的是西安建筑科技大学牛荻涛的预测模型^[6]。笔者在其模型的基础上对其进行改进以考虑不同应力水平和不同水灰比条件下的混凝土碳化深度预测模型。

文献[6]中的预测模型为:

$$x(t) = 2.56K_{MC} \cdot k_j \cdot k_{CO_2} \cdot k_p \cdot k_s \cdot T^{1/4} RH \cdot (1 - RH) \left(\frac{57.94}{f_{cuk}} m_c - 0.76 \right) \sqrt{t}$$

在其基础上, 考虑应力水平和水灰比因素, 对该公式加于改进得到新的碳化深度预测模型, 如式(1)所示:

$$x(t) = k\sqrt{t} = 2.56 \cdot k_j \cdot k_{CO_2} \cdot k_p \cdot k_f \cdot$$

$$f(\sigma_s, w/c) \cdot T^{1/4} RH (1 - RH) \sqrt{t} \quad (1)$$

式中: k 为混凝土碳化深度影响系数; k_j 为位置影响系数, 角部取 1.4, 非角部取 1.0; k_{CO_2} 为 CO_2 浓度影响系数, $k_{CO_2} = \sqrt{c_0/0.03}$; T 为构件表面附近年平均温度; RH 为构件表面附近年平均湿度; k_p 为浇筑面修正系数; k_f 为混凝土质量影响因素, $k_f = 57.94/f_{cuk} - 0.76$; $f(\sigma_s, w/c)$ 为综合考虑应力水平和水灰比的影响系数; t 为混凝土碳化时间, a 。

将试验相关参数带入式(1)可得:

$$f(\sigma_s, w/c) = \frac{\sqrt{365}}{29.354} \cdot k = 0.6508 \times k \quad (2)$$

1.2.2 不同应力水平对碳化深度的影响 为充分考虑不同应力水平和水灰比对混凝土碳化深度的影响程度, 将表中同一水灰比时不同应力水平的 k 值与应力水平为 0 时的 k 值相比较, 其比值如表 3 所示。

表3 不同应力水平条件下应力因素影响系数值

水灰比	应力水平 (σ/σ_c)				σ 应力	应力水平 (σ/σ_t)			
	-0.054	-0.027	-0.019	-0.008	0.000	0.103	0.248	0.352	0.703
$w/c=0.40$	0.896	0.924	0.962	0.995	1.000	1.021	1.134	1.201	1.360
$w/c=0.48$	0.874	0.898	0.932	0.967	1.000	1.005	1.125	1.185	1.345
$w/c=0.55$	0.854	0.904	0.941	0.977	1.000	1.008	1.095	1.180	1.333
平均值	0.875	0.909	0.945	0.979	1.000	1.011	1.118	1.189	1.346

从表3可以看出, 应力水平和水灰比的变化对碳化系数的影响是明显的, 但二者之间的相互交叉影响却不是很明显, 因此, 为简化分析, 可假定应力因素和水灰比因素对混凝土碳化的影响是相互独立的。则 $f(\sigma_s, w/c)$ 可表示为(3)式所示:

$$f(\sigma_s, w/c) = k_s \cdot k_{w/c} \quad (3)$$

式中: k_s 为应力影响系数; $k_{w/c}$ 为水灰比影响系数。

鉴于 $\sigma/\sigma_t = 0$ 或 σ/σ_c 时, $k_s = 1$, 考虑应力影响因素的系数 k_s 的表达式可表示为:

$$\text{受拉时: } k_{st} = 1 + g(\sigma/\sigma_t);$$

$$\text{受压时: } k_{sc} = 1 + g(\sigma/\sigma_c).$$

当水灰比一定时, $k_{st} = k_{si}/k_{s0} = k_i/k_0$, 带入试验数据, 各应力水平下的 k_{si} 值见表3所示。经过数学回归, 应力影响系数变量 k_s 的表达式可表示为:

受拉时:

$$k_{st} = 1 + 0.465(\sigma_s/\sigma_t) + 0.0457(\sigma_s/\sigma_t)^2 \quad (4)$$

受压时:

$$k_{sc} = 1/(1 + 2.92(\sigma_s/\sigma_c)) \quad (5)$$

1.2.3 不同水灰比条件对混凝土碳化深度的影响

由前面的分析已得到应力因素影响系数 k_s 的计算公式,将相关参数值代入式(1)可得到基于试验数据的水灰比影响系数值,如表 4 所示。

表 4 水灰比影响系数值

$k_{w/c}$	应力水平(σ/σ_c)				σ 应力	应力水平(σ/σ_t)			
	-0.054	-0.027	-0.019	-0.008		0.000	0.103	0.248	0.352
0.400	1.554	1.493	1.521	1.525	1.498	1.459	1.519	1.539	1.510
0.480	1.612	1.543	1.568	1.576	1.593	1.527	1.602	1.615	1.587
0.550	1.662	1.639	1.669	1.680	1.680	1.615	1.645	1.695	1.660

从表 4 可以看出,不同水灰比对混凝土碳化速度的影响也较明显,随着水灰比的增大,碳化速度也随之增大。数据回归水灰比影响系数公式如式(6)所示,

$$k_{w/c} = 1.566 - 0.946x + 2.03x^2 \quad (6)$$

1.2.4 混凝土碳化深度预测模型 将应力水平影响系数和水灰比影响系数函数代入式(3)可得到综合考虑应力因素和水灰比因素的混凝土碳化系数表达式,见式(7)和式(8)。

受拉时:

$$f(\sigma_s, w/c) = (1 + 0.465(\sigma_s/\sigma_t) + 0.0457(\sigma_s/\sigma_t)^2) \cdot (1.566 - 0.946x + 2.03x^2) \quad (7)$$

受压时:

$$f(\sigma_s, w/c) = 1/(1 + 2.92(\sigma_s/\sigma_c)) \cdot (1.566 - 0.946x + 2.03x^2) \quad (8)$$

将式(7)、(8)带入式(1)式即可得到修正后的混凝土碳化深度预测模型。

1.2.5 模型的验证 文献[13]给出了室内自然暴露 10 a 的几组试件在不同龄期时碳化深度的实测值,笔者引用其试验数据验证预测模型的有效性。该试验的相关环境参数为:温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, 环境湿度 $70\% \pm 20\%$, 二氧化碳浓度 0.034% , 混凝土立方体抗压强度值 17.9 MPa 。图 6 给出了通过该模型和文献[12]中模型确定的混凝土碳化深度预测值与试件实际检测值的对比结果。

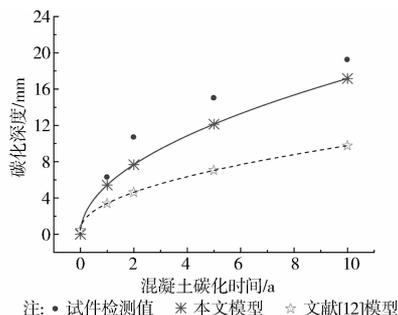


图 6 不同预测模型碳化深度预测值与试验值对比

通过对比分析可知,笔者确定的预测模型能较好的吻合试验检测数据,且碳化深度随时间的演变规律与检测数据的变化规律一致;而文献[12]确定的模型与实测数据偏离较大,且随着服役时间的增加,误差越明显,少数误差甚至达 50% 之多。同时可以看出在混凝土试件碳化早期,2 种预测模型计算值与实际检测值吻合均较好,如图 7 所示,这主要是因为预测模型都是基于快速碳化试验得到的,而影响混凝土碳化深度的各种因素在碳化早期比较稳定,实际工程中混凝土结构随着龄期的增长,这些因素的不确定性将增大,预测误差也随之增大。可见通过笔者确定的混凝土劣化模型能较好地预测混凝土结构未来服役期内的碳化深度值。

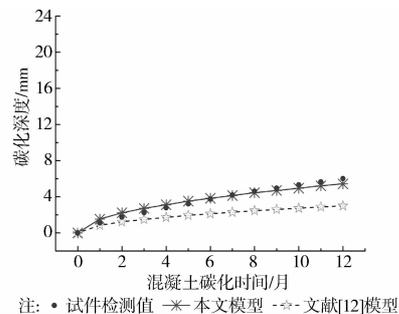


图 7 龄期 1 a 内不同预测模型碳化深度预测值与试验值对比

考虑到笔者确定的混凝土碳化深度预测模型是静态的,不能反映实际工程中各影响因素具有时变性的特点,而结构服役过程中采集到的数据能够降低这些影响因素的不确定性,因此,可充分利用混凝土结构服役期内检测到的新数据应用数学方法(贝叶斯估计)对混凝土碳化深度预测模型在未来龄期内的预测值进行修正。

2 基于耐久性的混凝土劣化模型分析

在进行混凝土材料劣化分析时,其失效指标的

选取比较重要^[14-16],研究表明,混凝土受力钢筋开始锈蚀后,钢筋混凝土结构的各项力学性能指标急剧下降。笔者以混凝土碳化深度达到钢筋表面一定距离(碳化残量)时的状态作为混凝土构件耐久性的极限状态^[17],当碳化残量小于安全碳化残量时,混凝土构件视为劣化失效,此时所处的时间作为混凝土构件寿命的终点。

混凝土基于碳化深度的劣化失效准则可表示为:

$$z(t) = c - \Delta c_k - x(t) < 0 \quad (9)$$

式中: c 为混凝土保护层厚度; Δc_k 为混凝土碳化残量; $x(t)$ 为混凝土碳化深度。

由于笔者提出的混凝土碳化深度预测公式是建立在试验检测数据平均值基础上的,没有反映出碳化深度具有随机性的特点,而通过对实际工程中大量实测数据的统计,混凝土的碳化深度能较好服从正态分布,其标准差记为 $\sigma_{x(t)}$, 均值记为 $\mu_{x(t)}$ 。同时, Δc_k 也是一个随机变量,它与环境相对湿度和混凝土抗压强度有关,对于一般大气环境,不考虑其随机性,取碳化安全残量 $\Delta c_k = 10$ mm。

根据概率理论,有: $\mu_z = c - \Delta c_k - \mu_{x(t)}$, $\sigma_z = \sigma_{x(t)}$, $\beta = \mu_z / \sigma_z$ 。

则失效概率为:

$$p = p(z < 0) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dz \quad (10)$$

将上述正态分布函数标准化得:

$$p = \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_z}{\sigma_z}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = \varphi(-\beta) = 1 - \varphi(\beta) \quad (11)$$

由式(11)可知,可靠度与失效概率存在着——对应的关系,图8给出了 $\sigma_{x(t)} = 0.355$ cm 时的混凝土结构劣化失效概率与可靠度指标之间的关系。因此结合碳化深度的预测公式,就能得到混凝土结构失效时间和碳化深度之间在具有相同可靠度保证时的关系。可见,混凝土结构的劣化失效时间可由混凝土保护层厚度和碳化深度来表征。

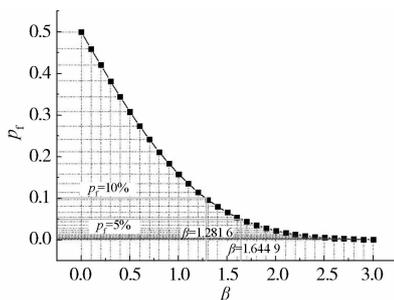


图8 失效概率 p_f 与可靠指标 β 的关系

为重点分析应力因素对混凝土结构劣化时间的影响,笔者以所确定的碳化深度预测模型和混凝土结构劣化模型为依据,分析了环境湿度为75%,年平均气温18℃,水灰比为0.48时的钢筋混凝土结构在不同保护层厚度下具有相同可靠度保证时,基于碳化深度的混凝土劣化失效时间与不同拉应力水平的关系,如图9所示。

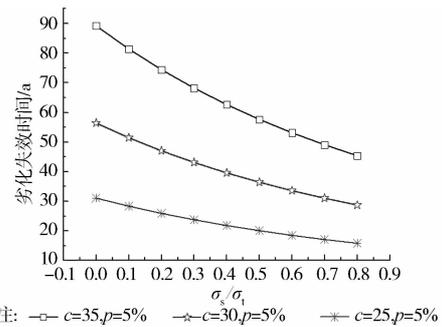


图9 混凝土构件失效时间与应力水平的关系

由分析可知,混凝土所处的应力状态和保护层厚度对混凝土结构劣化失效有显著影响,在失效概率(或可靠度)相同时,拉应力越大、保护层厚度越小,混凝土结构的劣化失效时间越早。特别是在保证结构劣化失效概率为5%时,对于保护层厚度小于30 mm的混凝土结构构件在拉应力状态下的耐久性几乎均不能达到50 a设计基准期内混凝土结构耐久性不变的要求,而对于按照混凝土结构设计规范GB 50010—2010之前设计的钢筋混凝土结构,其一、二类a环境的梁板柱保护层厚度均 ≤ 30 mm,可见对于大量已建建筑,需要进行混凝土耐久性评估和修复。

3 结论

1)给出了一般大气环境下修正的混凝土碳化深度预测模型,充分考虑了应力水平和水灰比等因素的影响。预测模型与试验检测数据吻合较好,且具有一定的理论依据,能充分反映不同应力状态下碳化深度随时间的演变规律。

2)建立了混凝土结构构件基于碳化深度的材料劣化模型,同时考虑到混凝土碳化深度具有随机性的特点,通过可靠性分析,建立了混凝土结构构件失效概率与可靠度的对应关系。同时根据劣化模型和碳化深度预测公式均能建立各影响因素与混凝土结构劣化失效时间之间的对应关系。

3)可靠性分析表明,混凝土保护层厚度和碳化深度与混凝土材料的劣化密切相关,混凝土构件所处的拉应力水平越大、保护层厚度越小,其距离劣化

失效的时间越短。

4)保护层厚度按照混凝土结构设计规范 GB 50010—2001 及以前设计的一、二类 a 环境下的钢筋混凝土结构,其耐久性几乎均不能满足 50 a 设计基准期内的耐久性要求,保护层越小,混凝土构件劣化失效越早。

参考文献:

- [1] 张誉,蒋利学. 基于碳化机理的混凝土碳化深度实用数学模型[J]. 工业建筑,1998,28(1):16-19.
Zhang Y, Jiang L X. A practical mathematical model of concrete carbonation depth based on the mechanism [J]. Industrial Construction,1998,28(1):16-19.
- [2] Aldea C M, Shah S P, Karr A. Effect of cracking on water and chloride permeability of concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1999, 11(3): 181-187.
- [3] Papadakis V G, Vayenas C G, Fardis M N. Fundamental modeling and experiment investigation of concrete carbonation [J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(4):363-373.
- [4] Hope Brian B. Chloride corrosion threshold in concrete [J]. ACI Materials Journal, 1987,84(4):306-314.
- [5] Castel A, Francois R. Effect of loading on carbonation penetration in reinforced concrete elements [J]. Cement and Concrete Research,1999,29(4):561-565.
- [6] 牛狄涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京:科学出版社,2003:18-33.
- [7] Tomosawaf. Japan's experiences and standards on the durability problems of reinforced concrete structures [J]. International Journal of Structural Engineering, 2009,1(1):1-12.
- [8] Weyes R E. Service life model for concrete structures in chloride laden environments [J]. ACI Materials Journal,1998,95(4):445-453.
- [9] 田浩,李国平. 受力状态下混凝土试件碳化试验研究 [J]. 同济大学学报:自然科学版,2010,38(2):200-204.
Tian H, Li G P. Experimental research on carbonation of forced concrete specimens [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010,38(2):200-204.
- [10] 罗小勇,邹洪波. 不同应力状态下混凝土碳化耐久性试验研究[J]. 自然灾害报,2012,21(2):194-199.
Luo X Y, Zou H B. Experimental study on durability of concrete carbonation at different stress states [J]. Journal of Natural Disasters, 2012,21(2):194-199.
- [11] Stewart M G. Effect of construction and service loads on reliability of existing RC building [J]. Journal of Structural Engineering, 2001,127(10):1232-1235.
- [12] 潘洪科,牛季收,杨林德,等. 地下工程砼结构基于碳化作用的耐久性劣化模型[J]. 工程力学,2008,25(7):172-178.
Pan H K, Niu J S, Yang L D, et al. The durability deterioration model based on carbonation for underground concrete structures [J]. Engineering Mechanics, 2008,25(7):172-178.
- [13] 吴本英,周锡武. 基于贝叶斯方法的混凝土结构碳化深度预测研究[J]. 武汉理工大学学报,2011, 33(3):103-107.
Wu B Y, Zhou X W. Carbonation depth prediction of concrete structures based on Bayesian approach [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(3):103-107.
- [14] 刘海,姚继涛. 一般大气环境下既有混凝土结构的耐久性评定与剩余寿命预测[J]. 建筑结构学报,2009,30(2):143-148.
Liu H, Yao J T. Durability evaluation and prediction of residual life for existing concrete structures and common atmosphere environment [J]. Journal of Building Structures, 2009,30(2):143-148.
- [15] 武海荣,金伟良. 基于可靠度的混凝土结构耐久性环境区划[J]. 浙江大学学报:工学版,2012,46(3):416-422.
Wu H R, Jin W L. Reliability-based zonation of environment area according to its effect on durability of concrete structures [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science,2012,46(3):416-422.
- [16] Ba M F, Qian C X. Probabilistic method and its application for evaluating carbonation life of newly-built concrete structures [J]. Journal of Southeast University: English Edition, 2010,26(4):578-581.
- [17] 牛狄涛,元成方. 基于耐久性检测的钢筋混凝土铁路桥碳化寿命预测[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2011,43(2):160-165.
Niu D T, Yuan C F. Carbonation service life prediction of reinforced concrete railway bridge based on durability test [J]. Xi'an University of Architecture and Technology :Natural Science Edition, 2011,43(2):160-165.

(编辑 胡英奎)