

文章编号: 1000-5013(2007)02-0192-04

混凝土碳化深度预测模型的比对与分析

李 浩, 施养杭

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 分析混凝土碳化机理和影响因素, 总结混凝土碳化深度的多种预测模型, 并根据工程实例对碳化模型进行比对和分析. 经工程实例验证, 得出在一般气候条件下, 内陆地区的普通工业建筑采用基于混凝土抗压强度的混凝土碳化深度预测模型, 进行预测其碳化深度较为适合.

关键词: 混凝土; 碳化深度; 预测模型; 碳化机理; 寿命预测

中图分类号: TU 317⁺. 1; TU 528.07

文献标识码: A

近年来, 混凝土碳化问题一直是国内外研究的热点, 国内外专家对碳化机理及碳化影响因素等问题有了深刻的认识, 并从不同角度提出了碳化深度的计算模型^[1]. 这为进一步研究混凝土中钢筋锈蚀与混凝土结构的寿命预测奠定了良好的基础. 本文总结了混凝土碳化深度的多种预测模型, 并对这些模型进行比对和分析. 经工程实例验证, 提出较适合混凝土碳化深度计算的预测模型.

1 混凝土碳化机理及其影响因素

1.1 混凝土的碳化机理

新鲜混凝土由于水泥水化作用, 生成有 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等水化产物, 呈现明显的碱性, pH 值达 12~13. 混凝土的碳化^[2]是指混凝土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与大气中渗透进混凝土中的 CO_2 等酸性气体发生化学反应的过程. 碳化降低混凝土的碱度, 为有害物质进入混凝土内部提供顺畅的“通道”, 进而破坏钢筋表面的钝化膜, 使混凝土失去对钢筋的保护作用. 在有水分和氧气存在的情况下, 混凝土中钢筋开始锈蚀. 与此同时, 碳化还加剧混凝土的收缩, 这都可导致混凝土的开裂甚至结构的破坏. 所以, 碳化深度是衡量混凝土结构可靠度的重要指标之一.

1.2 混凝土碳化的影响因素

影响混凝土碳化过程和碳化速度的因素很多, 对实际结构中, 可归纳为工艺因素和环境因素两类^[3]. 其中, 工艺因素主要有以下 4 类. (1) 水灰比. 混凝土的碳化速度随着水灰比的减小而降低. (2) 水泥品种和水泥用量. 一般而言, 水泥品种不同, 混凝土的碳化速度不同, 而碳化速度与水泥的用量成反比. (3) 施工质量和养护条件. 混凝土的早期养护和施工质量的好坏会使混凝土的抗碳化速度有成倍的差别. (4) 混凝土的强度等级. 碳化速度一般随强度等级的提高而降低. 环境因素主要有以下 4 种. (1) CO_2 等酸性气体的浓度. 浓度越大, 则碳化越快. (2) 空气湿度. 在常压下, 碳化速度随湿度的降低而增加, 但在饱和干燥情况下, 碳化速度几乎为零; 而在干湿交替变化过程中, 碳化速度会加快. (3) 空气温度. 一般来说, 温度越高, 碳化越快, 温度和压力的周期变化会加剧混凝土的碳化. (4) 混凝土的应力状态. 拉应力区的混凝土碳化速度一般较快.

收稿日期: 2006-09-29

作者简介: 李 浩(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事结构耐久性的研究; 通信作者: 施养杭(1962-), 男, 教授, E-mail: d. s666@163. com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478120); 建设部国家混凝土规范第 6 批科研课题(GBKY6001-02); 华侨大学高层次人才科研启动项目(05BS303); 安徽省高校青年教师自然科学基金资助项目(2005JQ1231)

2 混凝土碳化的预测模型

近 30 年来, 国内外不同的学者, 采用快速碳化试验、长期暴露试验、实际建筑物碳化调查及扩散理论等不同的方法, 对混凝土碳化问题进行了多角度的研究, 并围绕碳化系数建立了相应的碳化速度计算模型^[1]. 这些模型基本上可以归纳为 3 大系列. (1) 基于扩散理论建立的模型. (2) 基于碳化试验建立的经验模型. (3) 基于扩散理论与试验结果的碳化模型.

2.1 基于扩散理论的理论模型

基于扩散理论的理论模型认为, 空气中的 CO₂ 向混凝土内的渗透遵循 FICK 第一扩散定律, 其碳化模型可以表示为^[3]

$$X = \sqrt{\frac{2D_e C_0}{M_0}} \cdot \sqrt{t} \tag{3}$$

式中, X 为碳化深度 (mm); t 为碳化时间 (a); D_e 为 CO₂ 在混凝土中的扩散系数; C_0 为环境中 CO₂ 浓度; M_0 为单位体积混凝土吸收 CO₂ 的量.

2.2 基于碳化试验的经验模型

(1) 以水灰比为主要变量的经验模型. 模型以水灰比 (W/C) 为主要变量, 经大量试验, 得出了相应的碳化深度经验公式^[4]. 即

$$X = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 (12.1 \frac{W}{C} - 3.2) \sqrt{t} \tag{4}$$

式中, γ_1 为水泥品种影响系数, 矿渣水泥取 1.0, 普通水泥取 0.5~0.7; γ_2 为粉煤灰影响系数, 取代水泥量小于 15% 时取 1.1; γ_3 为气象条件影响系数, 我国的中部地区取 1.0, 南方取 0.5~0.8, 北方取 1.1~1.2. 基于水灰比变化, Nishi 提出了碳化深度计算公式^[5], 即

$$X = \frac{g}{\sqrt{k_w}} \sqrt{t} \tag{5}$$

式中, 当 $W/C \geq 0.6$ 时, $k_w = \frac{[0.3 \times (1.15 + 3 \times W/C)]}{[W/C - 0.25]^2}$; 当 $W/C < 0.6$ 时, $k_w = \frac{7.2}{[(4.6 \times W/C) - 1.76]^2}$; g 为集料品种、水泥品种和外加剂等影响系数.

(2) 以混凝土抗压强度为主要参数的经验模型. 邸小坛 等^[6] 提出了以混凝土抗压强度标准值为主要参数, 在考虑使用环境、养护条件和水泥品种等影响因素的基础上, 提出了碳化深度计算公式^[7]. 即

$$X = a_1 a_2 a_3 (\frac{60.0}{f_{cu}} - 1.0) \sqrt{t} \tag{6}$$

式中, f_{cu} 为混凝土抗压强度标准值 (MPa); a_1 , a_2 和 a_3 分别为养护条件修正系数、水泥品种修正系数和环境条件修正系数. 而 Smolczyk 基于混凝土抗压强度提出的其碳化深度计算公式^[7]. 即

$$X = 250 (\frac{1}{\sqrt{F_c}} - \frac{1}{\sqrt{F_g}}) \sqrt{t} \tag{7}$$

式中, F_c 为混凝土抗压强度 (MPa); F_g 为假定不碳化的极限强度, $F_g = 62.5$ MPa. (3) 多系数碳化深度经验模型. 龚洛书在综合考虑影响碳化速度的各种因素后, 提出了多系数碳化预测公式^[8]. 即

$$X = k_c k_w k_f k k_g k_y a \sqrt{t} \tag{8}$$

式中, a 为混凝土碳化速度系数, 对普通混凝土取 2.32, 对轻集料混凝土取 4.18; k_c , k_w , k_f , k , k_g , k_y 分别为水泥用量影响系数、水灰比影响系数、粉煤灰取代量影响系数、水泥品种影响系数、骨料品种影响系数和养护方法影响系数.

2.3 混凝土碳化预测的随机模型

牛荪涛等^[9] 从碳化模型入手, 以工程实用为目标, 考虑了环境条件与混凝土质量等主要影响因素, 以及碳化位置、混凝土养护浇注面、工作应力等情况, 提出了预测混凝土碳化深度的多系数随机模型公式. 即

$$X = 2.56 K_m k_{jCO_2} k_p k_s \sqrt[4]{1 - R_H} R_H (\frac{57.94}{f_{cu}} - 0.76) \sqrt{t} \tag{9}$$

式中, K_{mc} 为计算模式不定性随机变量; k_j 为角部修正系数; k_{CO_2} 为 CO_2 浓度影响系数; k_p 为浇注面修正系数; k_s 为工作应力影响系数; θ 为环境年平均温度 ($^{\circ}C$); R_H 为环境年平均相对湿度 ($\%$); f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度标准值.

3 混凝土碳化深度计算模型比对

(1) 理论模型的优点在于模型的物理意义明确, 模型有理论基础. 但不足之处是, 模型参数不易确定, 不便于工程应用, 且与试验结果的误差较大. (2) 经验模型是以快速碳化试验与室外暴露试验, 以及实际工程碳化调查为基础而建立, 对实际工程有较大意义. 经验模型公式的计算一般较为方便, 其系数选取需要结合实际工程. (3) 随机模型是以环境条件与混凝土质量为主要影响因素, 但其系数选取和模型计算都较为复杂, 同时系数选取也需要结合实际工程.

4 工程实例分析

4.1 工程概况

我国南方某内陆地区一连铸转炉屋面板^[1], 至检测时已使用了 17 a, 板周围平均温度为 $19\text{ }^{\circ}C$, 平均湿度为 80%, 板混凝土强度测得为 30 MPa, CO_2 浓度影响系数 k_{CO_2} 为 1.4, 混凝土应力状态影响系数 k_s 为 1.0, 采用 425 号普通硅酸盐水泥, 水泥用量为 $350\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 水灰比为 0.55, 结构为自然养护, 经混凝土碳化深度测试, 板碳化平均深度为 7.3 mm.

4.2 工程实例计算

根据上述的多种混凝土碳化深度的预测模型, 为分析比较方便, 对同一工程实例分别进行计算, 由式(4)~(9)可分别计算出碳化深度的计算值(X_c).

(1) 由式(4)可得, $X_c = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3 (12.1 \frac{W}{C} - 3.2) \sqrt{t} = 0.7 \times 1.1 \times 0.8 (12.1 \times 0.55 - 3.2) \sqrt{17} = 8.78$ (mm).

(2) 由式(5) 可得, $X_c = \frac{g}{\sqrt{k_w}} = \sqrt{t} = \frac{1}{\sqrt{1/12.14}} \times \sqrt{17} = 14.37$ (mm).

(3) 由式(6) 可得, $X_c = a_1 a_2 a_3 (\frac{60.0}{f_{cuk}} - 1.0) \sqrt{t} = 2.40 \times 1.0 \times 0.77 (\frac{60.0}{30} - 1.0) \sqrt{17} = 7.62$ (mm).

(4) 由式(7) 可得, $X_c = 250 (\frac{1}{\sqrt{F_c}} - \frac{1}{\sqrt{F_g}}) \sqrt{t} = 250 \times (\frac{1}{\sqrt{30}} - \frac{1}{\sqrt{62.5}}) \sqrt{17} = 18.10$ (mm).

(5) 由式(8) 可得, $X_c = k_c k_w k_f k_g k_y a \sqrt{t} = 2.63 \times 2.43 \times 1.1 \times 1.0 \times 0.121 \times 1.0 \times 2.32 \sqrt{17} = 8.27$ (mm).

(6) 由式(9) 可得, $X_c = 2.56 K_{mc} k_j k_{CO_2} k_p \sqrt[4]{T(1-R_H)R_H} (\frac{57.94}{f_{cu}} - 0.76) \sqrt{t} = 2.56 \times 1.0 \times 1.4 \times 1.4 \times 1.0 \times 1.0 \times \sqrt[4]{19(1-0.8) \times 0.8 \times (\frac{57.94}{30} - 0.76)} \sqrt{17} = 8.10$ (mm)

4.3 结果比对与分析

工程实例的计算值(X_c)及实测值(X_m), 如表 1 所示. 表中, $\Delta X = X_c - X_m$. 由表 1 可知, 文[6]基于混凝土抗压强度的预测模型, 其计算值与实测值比较接近. 而基于多系数的碳化深度模型

表 1 不同预测模型计算结果

Tab. 1 Results of different predictive models				
计算式	X_m/mm	X_c/mm	ΔX	$\Delta X \cdot X_m^{-1}/(\%)$
式(4)	7.3	8.78	1.48	20.27
式(5)	7.3	14.37	7.07	96.85
式(6)	7.3	7.62	0.32	4.38
式(7)	7.3	18.40	11.10	152.10
式(8)	7.3	8.14	0.84	11.51
式(9)	7.3	8.10	0.80	10.96

普通工业建筑. 现在用该模型来计算某内陆地区一厂房的梁、柱、吊车梁和屋架的碳化深度, 将预测值于实测值进行比较, 结果如表 2 所示. 由表 2 中可以看出, 采用文[6]以混凝土抗压强度为主要参数的经验模型, 其预测值与实测值基本符合, 误差在允许范围之内.

5 结束语

经本文的分析、计算和比对, 得到如下 5 点结论. (1) 基于碳化试验的经验模型公式较多, 差别较大, 出发点不同, 应用不具普遍性. (2) 在实际工程中, 应该优先考虑基于碳化试验建立的经验模型, 其次考虑基于扩散理论与试验结果的碳化模型, 理论模型不适合于工程应用. (3) 影响混凝土碳化的因素比较复杂, 主要反映在环境与混凝土本身品质两大方面. 虽然国内外学者建立了许多不同碳化模型, 但对于混凝土碳化深度预测模型, 还要做大量的研究工作. (4) 从本文以上的分析可知, 对内陆地区, 一般气候条件下的普通工业建筑, 采用邸小坛的以混凝土抗压强度为主要参数的经验模型进行预测较为合适. (5) 鉴于预测模型的多样性, 为便于工程实际应用, 有待于建立同一的计算模型. 模型应该考虑水灰比、抗压强度、水泥用量和品种, 以及掺和料等多种因素的影响.

参考文献:

[1] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 60-80.
[2] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 40-60
[3] 屈文俊, 车惠民. 既有混凝土桥梁的碳化分析及耐久性预测[J]. 铁道学报, 1996, (4): 80-81.
[4] 章国成, 杨利伟, 王天稳. 混凝土碳化深度预测模型的对比分析[J]. 建筑技术开发, 2005, (3): 81-83.
[5] 许丽萍, 黄土元. 预测混凝土中碳化深度的数学模型[J]. 上海建材学院学报, 1997, (12): 437.
[6] 邸小坛, 周 燕. 混凝土碳化规律研究[J]. 中国建筑科学研究, 1995, (4): 31-35.
[7] 杜应吉, 梁正平. 韦水倒虹工程混凝土碳化深度预测研究[J]. 水利水电科技进展, 2005, (3): 48-50.
[8] 郭院成, 霍 达, 王云昌, 等. 混凝土碳化深度模糊预测[J]. 河南科学, 1998, (4): 437.
[9] 牛荻涛, 石玉钊, 雷怡生, 等. 混凝土碳化的概率模型及碳化可靠性分析[J]. 西安建筑科技大学学报, 1995, 27(3): 253

Discussion of Concrete Carbonation Depth Predictive Models

LI H ao, SHI Y ang-hang

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The mechanism and influencing factors of concrete carbonation are analyzed, and various predictive models of concrete carbonation depth are discussed. For the inland common industry buildings under the general weather condition, the predictive model of concrete carbonation depth based on the concrete compressive strength is preferable to predict concrete carbonation depth, which is tested by the practical engineering.

Keywords: concrete; carbonation depth; predictive models; carbonation mechanism; life prediction

(责任编辑: 黄仲一)