

文章编号: 1000-5013(2008)04-0600-05

混凝土结构碳化寿命可靠度分析

施养杭, 李 浩

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 探讨混凝土碳化机理及其影响因素, 提出结构随机寿命概念. 应用随机原理和可靠度理论, 对混凝土结构碳化寿命进行耐久性可靠度分析, 进而提出适合计算的碳化寿命预测方法. 在取得现场实测有关数据后, 考虑实际可靠度指标和耐久性失效多重标准, 利用锈蚀开裂计算公式, 对结构构件进行碳化可靠度分析, 预测其剩余碳化寿命, 可由定性分析和评估结构可靠性, 升级为定量预测其剩余寿命. 对混凝土结构耐久性失效准则的合理选择, 是进行耐久性评估与寿命预测的重要前提, 并不存在一个规定不变的耐久性评估准则. 以碳化程度为基础的耐久性失效准则, 对于重要结构及其构件是适宜和可靠的.

关键词: 混凝土; 碳化深度; 预测模型; 结构寿命; 可靠度

中图分类号: TU 503; TB 114.3

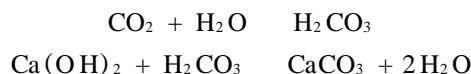
文献标识码: A

混凝土碳化是空气中二氧化碳与水泥石中的碱性物质相互作用, 致使其成分、组织和性能发生变化, 并使其机能下降的一种复杂的物理化学过程^[1]. 碳化引起混凝土的碱度降低, 进而破坏钢筋表面的钝化膜, 使混凝土失去对钢筋的有效保护作用, 继而导致混凝土中钢筋锈蚀. 在一般大气环境中, 碳化引起的钢筋锈蚀是十分普遍的现象, 是混凝土耐久性的关键问题之一; 同时, 混凝土碳化加剧混凝土的收缩, 从而导致混凝土产生裂缝和结构的破坏. 可见, 碳化与混凝土结构的耐久性密切相关, 势必关系到混凝土保护层的锈胀、开裂、脱落、与钢筋的黏结力、钢筋面积的损失、构件材料物理力学性能及其刚度的承载力的不断下降, 乃至丧失, 从而影响结构的适用性、安全性. 因此, 混凝土碳化程度是衡量钢筋混凝土结构可靠度的重要指标. 我国大量土木、水利工程中的钢筋混凝土结构已逐渐进入“老化”阶段, 迫切需要对其进行科学检测、鉴定、评价与寿命预测. 如何预测在役钢筋混凝土结构的剩余寿命, 充分挖掘已有钢筋混凝土结构的使用潜力, 已成为一个迫切需要解决的课题^[2-3]. 本文探讨混凝土结构碳化寿命的耐久性可靠度分析.

1 混凝土碳化机理及其影响因素

1.1 混凝土的碳化机理

新鲜混凝土因水泥水化作用, 生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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^[4]. 其主要化学反应式为



因此, 混凝土碳化的实质是混凝土的中性化, 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

收稿日期: 2008-02-11

作者简介: 施养杭 (1962-), 男, 教授, 博士, 主要从事结构耐久性与健康诊断的研究. 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 批科研攻关课题 (GBKY6001); 华侨大学高层次人才科研启动项目 (05BS303)

至结构的破坏。

1.2 混凝土碳化的影响因素

反映混凝土碳化程度有两个指标,即碳化速度和碳化深度。影响碳化程度的因素很多,对实际结构,可归纳为工艺因素和环境因素两类^[5]。

工艺因素主要包括如下4个方面。(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。

环境因素则主要包括如下4个方面。(1) CO_2 等酸性气体的浓度。气体浓度越大,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。

1.3 碳化对混凝土耐久性的影响

混凝土由表及里发生碳化作用,混凝土的 pH 值呈外低内高变化。当碳化达到钢筋表面后,钢筋表面呈现活化状态,钢筋的钝化膜遭受破坏,致使钢筋失去钝化膜的保护作用而发生锈蚀。钢筋锈蚀物的体积是相应原钢筋体积的 2~4 倍,即出现膨胀现象^[6],从而向四周扩展。随着锈蚀的加剧,导致混凝土保护层的开裂,钢筋与混凝土的黏结力受损和破坏;同时,受力钢筋截面减少,结构强度衰退,导致结构耐久性的降低,引起结构失效。

2 混凝土结构碳化寿命预测

2.1 结构寿命的概念

结构寿命是指结构在使用过程中满足既定功能的年限^[1]。结构寿命预测是指在特定使用环境下,对新建结构的合理使用年限,或对现役结构剩余使用年限进行预测,它是结构耐久性设计的重要环节,也是对建筑结构进行可靠度评估和维护决策的前提条件。

结构应满足的具体功能因其用途不同而异,我国现行规范明确规定,建筑结构必须满足安全性、适用性和耐久性的要求,统称为可靠性。根据不同的功能要求,结构寿命终结的标准(即判据)也不同,结构寿命的定义也有相应区别。目前,国际通常将结构寿命分为如下3类。

(1) 技术寿命。它指结构从开始使用起,在使用过程中,因受到外界荷载作用或因材料性能随时间退化而导致结构性能的退化,以至于不能满足结构安全性要求为止的时间。技术寿命的终结标准是承载能力极限状态,又称为安全寿命。

(2) 功能寿命。它指结构从开始使用起,在使用过程中,因荷载或环境因素作用引起结构材料性能的退化,导致结构无法满足正常使用要求为止的年限。功能寿命的终结标准是正常使用极限状态,如混凝土保护层开裂、剥落、“过度”的变形等耐久性破坏。因此,又称为耐久寿命。

(3) 经济寿命。它指从经济优化的角度考虑,结构开始使用到继续维护或加固,若保留如此状态已不如拆换更为经济和合理时的年限。

可见,上述寿命均为“条件”寿命,针对具体结构如何确定,取决于结构的重要性、使用功能和环境条件等因素。

2.2 结构寿命的评估准则

由于混凝土结构的使用寿命受各种环境条件和材料本身性能的影响,人们尚未能准确地把握其失效的全过程,致使对结构耐久性极限状态的确定未能达成共识。目前,评估混凝土结构剩余寿命的方法有多种,常见的如根据结构失效形式不同,可把结构寿命分为正常使用寿命和承载力使用寿命;根据结构老化状态不同,可把结构寿命分为碳化使用寿命、钢筋锈蚀使用寿命和锈蚀开裂使用寿命^[1]。任何一种寿命都应有明确的寿命终止准则及相应的计算方法。

2.3 碳化随机寿命准则

工程实践和研究表明,碳化是混凝土结构耐久性失效的主要初始诱因之一。采用碳化寿命准则的主

要理由是,考虑到钢筋一旦开始锈蚀,只要有不大的锈蚀量和不长的时间,就足以导致混凝土开裂,开裂后的锈蚀又受到更多随机因素的影响,对此很难做出定量的估计.目前,大都以混凝土碳化深度达到钢筋表面作为钢筋锈蚀的标志^[7].在一般情况下,将混凝土碳化寿命作为混凝土结构使用寿命终止的标准显得过于保守.对于不允许钢筋锈蚀的预应力钢筋混凝土结构,这一标准更为合适.因此,以钢筋开始锈蚀为标准的寿命准则即为碳化随机寿命准则.

混凝土碳化寿命准则^[8]可以表示为

$$c = \{c - x_0 - X(t) = 0\}. \quad (1)$$

式(1)中, c 为混凝土保护层厚度, x_0 为碳化残量, $X(t)$ 为混凝土碳化深度, c 为混凝土碳化寿命准则. c 和 x_0 都为随机变量, $X(t)$ 和 c 都为随即过程.混凝土保护层厚度 c 服从正态分布 $N(\mu_c, \sigma_c)$,其概率密度函数为

$$P(c) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_c} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{c - \mu_c}{\sigma_c}\right)^2\right]. \quad (2)$$

式(2)中, $P(c)$ 为混凝土保护层厚度的概率密度函数, μ_c 为混凝土保护层厚度的平均值, σ_c 为混凝土保护层厚度的标准差.

2.4 混凝土碳化耐久性分析

碳化的影响因素很多,例如水泥品种、水泥用量、水灰比、外加剂品种,以及混凝土的养护条件、混凝土本身的离散性和环境条件的变异性等.混凝土碳化过程具有显著的随机性,主要体现在碳化速率系数 K . K 为综合反映影响碳化因素的随机变量,它的取值受诸多随机变量因素的影响.从理论上讲,如果找出单个随机变量统计特征或概率密度函数,就可求出随机函数 K 的统计特征或密度函数.

目前,由于现状和实际原因,还不能对每个随机变量进行统计计算.因此,大多数分析方法均采用试验结果对碳化深度 X 及其相应的碳化速度系数 K 的平均值和标准差进行取值,然后以碳化深度达到混凝土保护层厚度为结构的耐久性极限,采用可靠性理论方法对混凝土结构进行耐久性分析.

统计分析和研究^[9]表明,碳化深度的概率模型可用正态分布表征,其密度函数可以表示为

$$f_x(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}k\sqrt{t}} \exp\left\{-\frac{[x - \mu_k\sqrt{t}]^2}{2[k\sqrt{t}]^2}\right\}. \quad (3)$$

式(3)中, t 为碳化时间(a), μ_k 和 k 分别为碳化系数的平均值和标准差.

混凝土碳化耐久性失效,即钢筋发生锈蚀的极限状态方程为

$$Z(t) = c - x_0 - X(t) = 0, \quad (4)$$

则钢筋发生锈蚀的概率为

$$P_{f,c}(t) = P\{c - x_0 - k\sqrt{t} < 0\}. \quad (5)$$

在正常使用和正常维护条件下,在役期内结构不发生耐久性失效的概率称为结构耐久度,相应的混凝土碳化耐久性失效准则的耐久度称为碳化耐久度^[1],可表示为

$$P_{DC}(t) = P\{c - x_0 - k\sqrt{t} > 0\}. \quad (6)$$

相应的可靠度指标可表示为

$$\beta_c = -\Phi^{-1} P_{f,c} \quad (7)$$

由式(5)求得的钢筋开始锈蚀概率是结构服役时间 t 的函数.为预测结构的碳化随机寿命,必须给出允许的钢筋锈蚀概率.牛荪涛等^[1]将混凝土构件分为预应力混凝土构件和非预应力混凝土构件,提出了钢筋开始锈蚀的允许概率和碳化目标可靠度指标,见表1所示.

表1 钢筋开始锈蚀的允许概率

Tab.1 Allowable probability of steel corrosion

分类	$P_{f,c}/\%$	β_c
预应力混凝土构件	10	1.25
普通混凝土构件	重要建筑	0.5
	一般建筑	0

2.5 结构可靠指标计算方法

考虑到直接应用数值积分方法计算结构失效概率的困难,工程中大多采用近似方法.为此,引入了结构可靠指标的概念.假设结构抗力 R 和作用效应 S 均服从正态分布,其平均值分别为 μ_R, μ_S ,标准差分别

为 $Z = R - S$, 则结构功能函数 $Z = R - S$ 也服从正态分布. 平均值和标准差可分别表示为

$$\begin{aligned}\mu_Z &= \mu_R - \mu_S, \\ \sigma_Z &= \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2},\end{aligned}$$

则失效概率为^[10]

$$p_f = P(Z < 0) = F_Z(0) = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sigma_Z \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z - \mu_Z)^2}{2\sigma_Z^2}\right] dz \tag{8}$$

引入标准化随机变量 t (即 $\mu_t = 0, \sigma_t = 1$), 则

$$p_f = \int_{-\infty}^{-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta). \tag{9}$$

由式(9)可见, $\beta = \mu_Z / \sigma_Z$ 与 p_f 之间存在着——对应的关系, 可以此作为衡量结构可靠性的指标, 称为可靠指标. 若 R 和 S 均服从正态分布, 即有

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}, \\ p_f &= 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta), \\ &= \Phi^{-1}(1 - p_f).\end{aligned}$$

3 工程实例分析

3.1 工程概况

某钢筋混凝土受弯构件(屋面梁)^[11]. 其参数: 梁跨度为 6 m, 间距为 3.9 m, 截面尺寸为 250 mm × 500 mm, 混凝土保护层厚度为 25 mm, 混凝土强度等级为 C20, 纵向受力钢筋为 HRB335, 直径为 16 mm, 配筋率为 1.2%, 箍筋和构造钢筋为 HPB235, 直径为 8 mm. 该地区室外环境为平均湿度 71%、平均温度为 13℃, 在服役 40 a 后, 经碳化试验, 得出一组碳化深度样本值分别为 18.3, 16.8, 17.0, 19.6, 20.3, 22.1, 21.4, 20.8, 19.1, 18.8 mm.

3.2 实例分析

(1) 碳化可靠度指标. 利用线性无偏参数估计方法^[11], 经计算得到构件混凝土碳化深度服从正态分布 $N(25, 3^2)$. 在正态分布下, 参数估计值为 $\mu_d = 19.42, \sigma_d = 1.86$.

若不考虑碳化残量的影响, 混凝土保护层厚度和混凝土碳化深度均服从正态分布, 则有

$$\begin{aligned}\mu_Z &= \mu_R - \mu_S = 25 - 19.42 = 5.58, \\ \sigma_Z &= \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} = \sqrt{3^2 + 1.86^2} = 3.53, \\ \beta &= \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{5.58}{3.53} = 1.58.\end{aligned}$$

为分析简便, 采用中心点法计算失效概率. 中心点法^[11]的特点是, 可以直接给出可靠指标与随机变量统计参数之间的关系, 尤其对于 $\beta = 1 \sim 2$ 之间的正常使用极限状态可靠度的分析, 更为适用. 因为 $\beta = 1.58$, 所以采用中心点法, 则得

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) = \Phi(-1.58) = 0.0571.$$

根据误差传递公式, 当前时刻混凝土碳化系数 k 的参数分别为

$$\mu_k = \frac{19.42}{\sqrt{40}} = 3.071, \quad \sigma_k = \frac{1.86}{\sqrt{40}} = 0.294, \quad \beta_k = \frac{0.294}{3.071} = 0.096.$$

(2) 构件的剩余碳化寿命. 根据《GB 50068 - 2001 建筑结构可靠度设计统一标准》的要求, 结构构件正常使用极限状态的可靠指标, 可根据其可逆程度确定, 但不宜小于 0.5^[12]. 该建筑为普通建筑, 如表 1 所示, 可取 $\beta = 0$. 若使用环境、自然环境和前 40 a 大致相同, 假定混凝土碳化系数 k 不随时间而变化, 碳化寿命为 T_c , 则有

$$\beta = \frac{25 - 3.071 \sqrt{T_c}}{\sqrt{0.294^2 T_c + 3^2}} > 0.$$

经解不等式得 $T_c < 66.27$, 取 $T_c = 66$ a. 由于结构已经使用了 $t_i = 40$ a, 故其剩余碳化寿命 $T_{c,s} = 26$ a.

4 结束语

混凝土碳化的影响因素多,且与时间有关,显然具有随机性.因此,与混凝土碳化相关的钢筋锈蚀更具随机性.实例验证表明,考虑实际可靠度指标和耐久性失效多重标准,由定性分析和评估结构可靠性,升级为定量预测其剩余寿命,更具重要的实际应用意义.所提出的碳化寿命概念清楚,相应的耐久性失效准则简单,与随机理论和可靠度计算理论相适宜,计算过程简捷,方法简便,结果可靠.

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.
- [2] 赵尚传,赵国藩,贡金鑫.在役混凝土结构最优剩余使用寿命预测[J].大连理工大学学报,2002,42(1):83-87.
- [3] 赵尚传,赵国藩.基于可靠性的在役混凝土结构剩余使用寿命预测[J].建筑科学,2001,17(5):19-22.
- [4] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性[M].北京:科学出版社,2002.
- [5] 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,(6):80-81.
- [6] 李检保.混凝土碳化及其碳化后力学性能试验与分析[D].上海:同济大学,1997.
- [7] 牛荻涛,董振平,浦聿修.预测混凝土碳化深度的随机模型[J].工业建筑,1999,29(9):41-45.
- [8] 赵宏延.一般大气条件下钢筋混凝土构件剩余寿命预测[D].北京:清华大学,1993.
- [9] 牛荻涛,石玉钗,雷怡生.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,1995,9:253.
- [10] 赵国藩,曹居易,张宽权.工程结构可靠度[M].北京:水利电力出版社,1984.
- [11] 赵国藩,金伟良,贡金鑫.结构可靠度理论[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [12] 中华人民共和国建设部. GB 50068 - 2001. 建筑结构可靠度设计统一标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2001.

Reliability Analysis on Life of Carbonized Concrete Structure

SHI Yang-hang, LI Hao

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

Abstract: The mechanism of carbonation of concrete and its effects are investigated, and the concept of structure stochastic life is put forward. Based on the stochastic principle and reliability theory, the durability and reliability of the carbonation life of concrete structures are analyzed, then a prediction method to calculate the life of carbonation is presented. Obtaining the test data in situ, considering the actual reliability target and the multiple standards of durability failure, and using the formula of corrosion crack, the carbonized reliability of the structural element is analyzed, its residual carbonized life is forecast, so the qualitative analysis and appraisal of the structure reliability may be upgraded to the quantitative prediction of its residual life. The reasonable selection of criteria to assess the durability failure of RC structure is an important precondition in life prediction, the criteria based on the degree of carbonation is suitable and reliable for important structure and elements.

Key words: concrete; carbonation depth; prediction model; structure life; reliability

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)