



# 海港工程混凝土结构耐久性寿命 预测与健康诊断系统的设计与开发<sup>\*</sup>

董桂洪, 范志宏, 王迎飞

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:** 基于我国实际环境的海港工程混凝土结构寿命预测模型, 以Visual C# .NET和IMSL C#科学计算函数库为平台, 开发出适用于中国本土的海工混凝土寿命预测软件《海工混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断系统V1.0》。软件的数学模型和数据来源于交通部西部交通建设科技项目—海港工程混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断研究的主要成果, 在实际生产中, 具有广泛的应用前景。系统实现了对新建工程进行耐久性设计, 对已建工程进行耐久性剩余使用寿命预测。

**关键词:** 海工混凝土; 寿命模型; Visual C# .NET; IMSL

**中图分类号:** TU 528

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972 (2013) S1-0098-05

## Design and development of durability life prediction and health diagnostic system for marine concrete structures

DONG Gui-hong, FAN Zhi-hong, WANG Ying-fei

(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510300, China)

**Abstract:** Based on the physical environment of the life prediction model for marine concrete structures in China, taking the Visual C #. NET and the IMSL C # library as the platform, we developed the life prediction software for marine concrete applicable to China, the System for Durability Life Prediction Healthily of Harbor and Marine Concrete Structures v1.0. The mathematical model and data of the software come from the main results of the Western communications construction project of the Ministry of Transport, Durability Life Prediction and Health Diagnosis of Marine Concrete Structures. This system has a broad application prospect in the actual production. By this system, we can realize the durability design for the new construction, and prediction of the remaining service life for the old construction.

**Key words:** marine concrete; service life model; Visual C# .NET; IMSLsimulation; software TK-2D; Lingdingyang bay

处于海洋环境下的港口码头、道路桥梁等海工混凝土结构, 由于氯盐的侵蚀造成钢筋腐蚀被公认为是导致混凝土结构破坏的最主要原因, 由此引起混凝土结构破坏已成为全世界普遍关注并日益突出的一大灾害。海港工程混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断主要研究内容是根据我国

的具体港工工程调查情况, 结合室内试验、混凝土构件暴露试验与港工结构物的原型检测结果, 正确选择模型各项参数, 确定可以反映我国实际情况的混凝土结构物使用寿命计算模型。国际上有代表性的氯盐环境下混凝土结构使用寿命计算模型主要有3类, 分别是欧洲的Dura Crete模型、

收稿日期: 2010-09-01

<sup>\*</sup>基金项目: 西部交通建设科技项目 (200632800003-11)

作者简介: 董桂洪 (1978—), 男, 硕士, 建筑材料工程师, 高级程序员, 主要从事混凝土结构耐久性技术研究。

美国的Life-365模型和日本的土木学会模型, 都是基于Fick第二扩散定律。而只有美国Life-365模型开发对应的计算机软件, 实现了海工混凝土结构耐久性设计和寿命计算机化计算。

Microsoft Visual C# .NET是一种面向对象编程的语言, 它是为生成在.NET Framework 上运行的多种应用程序而设计的。C#简单、功能强大, 能实现应用程序的快速开发。IMSL C#是一个数值分析的链接库, 程序员可以将其直接嵌入所开发的应用程序中。它的应用节省了程序员95%的开发时间, 免去了程序员对复杂数值算法的细节研究, 使更多的精力投入到业务逻辑的设计上, 使软件系统变得更专业、更实用。

该系统是基于海港工程混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断研究成果的基础上, 使用Visual C# .NET和IMSL C# 数值分析函数库实现, 适合我国实际情况的混凝土结构物使用寿命计算模型的计算机软件。

## 1 系统寿命计算模型

系统数学模型的建立基于Tuutti<sup>[1]</sup>和Henriksen<sup>[2]</sup>等学者提出的在盐污染环境下的混凝土腐蚀破坏过程的阶段模型, 一般可分为如下2个阶段: 腐蚀诱导阶段和腐蚀发展阶段。

### 1.1 腐蚀诱导阶段

腐蚀诱导阶段指结构开始暴露于盐污染环境中, 盐离子逐渐向混凝土内部扩散, 当混凝土保护层深度的盐离子浓度达到钢筋开始锈蚀的临界浓度值时所经历的时间。海港工程混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断研究项目的腐蚀诱导阶

段以Fick 第二扩散定律为基础<sup>[3]</sup>。

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

当边界条件 $C(0, t)=C_s$ ,  $C(\infty, t)=C_0$ ; 初始条件 $C(x, 0)=C_0$ ;  $D_t$ 扩散系数为时间 $t$ 的常数时, Fick第二定律的解析解为式(2):

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

Thomas等根据大量的试验结果, 发现扩散系数与时间的关系可以用一个指数的形式加以描述<sup>[4-5]</sup>:

$$D_t = D_{ref} k_t k_e \left( \frac{t_{ref}}{t} \right)^n \quad (3)$$

海港工程混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断研究认为扩散系数不会随着时间延长无限地衰减, 而取扩散系数衰减到30 a作为有效扩散系数。系统的主要参数是根据我国的具体港工工程调查情况、结合室内试验、混凝土构件暴露试验与港工结构物的原型检测结果, 确定式(2)和(3)中的关键参数取值, 包括表面氯离子浓度、临界浓度、扩散系数衰减值。

### 1.2 腐蚀发展阶段

钢筋开始锈蚀后, 在氧气及水份供应充足的条件下, 钢筋的电化学腐蚀反应顺利进行, 随着腐蚀产物体积的增加, 其膨胀拉应力大于混凝土抗拉强度, 导致混凝土保护层开裂的时间即为腐蚀发展阶段。混凝土保护层开裂的时间长短与钢筋直径、氧气和水的扩散速率、混凝土电阻率的大小等有关。海港工程混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断研究通过理论分析、电化学快速锈蚀试验得到了混凝土保护层锈胀开裂阶段的计算模型如式(4)所示。

$$t_1 = K_d K_m K_{i,RH} \frac{k_1 k_2 k_3 \left[ 12.93 \left( \frac{w}{b} \right)^{1.55} \cdot f_c^{0.34} \left( 1 + \frac{2c}{d} \right)^{0.15} \cdot d^{-0.30} \right]}{\exp(16.816 + 0.618 \ln \operatorname{con}_{Cl^-} - 3.034/T - 0.028T - 5 \times 10^{-3} \rho)} \quad (4)$$

式中:  $K_d$ 为钢筋直径系数;  $K_m$ 为矿物掺合料系数;  $K_{i,RH}$ 为环境系数;  $\operatorname{con}_{Cl^-}$ 为混凝土中氯离子含量;  $K_1$ 为矿物掺合料影响系数;  $k_2$ 为钢筋位置修正系数;  $k_3$ 为钢筋种类修正系数;  $T$ 为环境温度;  $\rho$ 为混凝土电阻率;  $w/b$ 为混凝土水胶比;  $c$ 为混凝土

保护层厚度;  $d$ 为钢筋直径;  $f_c$ 为混凝土28 d抗压强度。

## 2 系统设计

根据海港工程混凝土结构耐久性寿命预测与

健康诊断研究成果模型, 关键参数和修正系数的取值取决于环境信息、混凝土配合比信息、构件信息(使用钢筋类型、大小、混凝土强度、保护层厚度等)。由于采用面向对象编程技术开发软件, 系统由几个重要的基类组成, 它们包括:

1) 环境信息类Environment Class, 主要功能用于记录构件所处环境的信息, 包括所在的区域、城市码头、该地区的气候信息、暴露信息等, 以及计算得出由这些信息决定的模型关键参数值和系数值。

2) 混凝土配合比信息类Concretemix Class, 主要功能用于记录构件混凝土配合比的信息所包括水胶比、掺合料的种类和掺量等信息, 以及计算得出由这些信息决定的模型关键参数值和系数值。

3) 构件信息类Component Class, 主要功能用于记录构件信息所包括使用钢筋类型、大小、混凝土强度、保护层厚度、氯离子分布曲线等信息, 以及计算得出由这些信息决定的模型关键参数值和系数值。

4) 数学功能类Math Class, 主要实现模型所有的数学计算功能, 包括寿命计算、氯离子曲线的非线性回归, 该类引用了IMSL数值分析函数的误差函数、非线性回归函数。

系统同时采用了数据库技术, 用以收集在根据海港工程混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断研究过程中的有关混凝土试验配合比的信息及氯离子扩散系数和混凝土的涂层附加措施, 用于系统推荐混凝土耐久性设计措施的依据。

由于系统的开发使用了面向对象编程技术和数据库技术两类计算机技术, 使系统具有良好的扩展能力, 为日后系统后续版本的改进工作提供方便。后续版本只需继承扩展系统主要的基类, 便可实现系统功能的不断增强; 随着日后混凝土设计工作的增多, 可不断充实系统的数据库, 使系统更加实用、计算结果更加精确, 推荐混凝土配合比更加合理全面。

系统功能实现以下主要功能: 1) 对于新建

工程, 可根据工程所处的特定环境, 系统进行设计使用年限和耐久性设计, 即对应设计使用年限, 可确定混凝土的结构参数和混凝土耐久性性能参数, 从而进行耐久性设计。2) 对于已建工程, 可根据工程所处的特定环境, 系统进行耐久性剩余使用寿命预测。3) 对符合北欧试验方法NT Build 443 氯离子渗透试验标准的数据进行批量处理, 非线性回归氯离子曲线的表面氯离子浓度和氯离子扩散系数。

### 3 系统开发及算例

#### 3.1 系统的开发

系统软件具备操作简便、界面友好的特点, 并且能够实现数据储存和报告的输出, 用户界面采用标准的Windows图形用户界面(GUI), Visual C# .NET提供了丰富的图形控件用来开发用户界面。同时, 采用面向对象的编程方法, 不仅减少了界面程序的代码量, 而且大大提高了程序的可读性和可维护性, 主界面如图1所示。

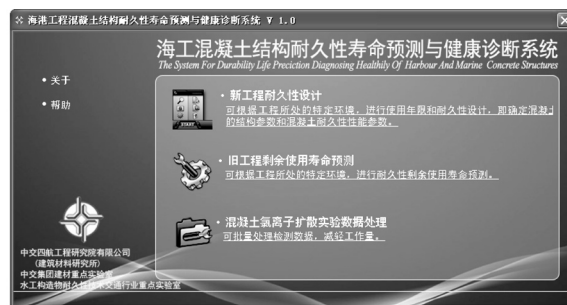


图1 系统主界面

剩余使用寿命预测模块和混凝土氯离子扩散实验数据处理模块。每个模块主要包括用户界面、业务逻辑和数据存取3个部分, 采用Visual C# .NET提供的面向对象的编程功能将这3个部分有机整合为一个系统[4]。业务逻辑是各个模块的重点部分, 是系统对数据的加工和处理, 这一部分工作是通过系统的主要基类完成。将业务逻辑和用户界面在逻辑上分开, 使得系统实现更加简明清晰。

#### 3.2 算例

验证《海工混凝土结构耐久性寿命预测与健

康诊断系统V1.0》的工作流程和计算结果, 仅以华南地区浪溅区的混凝土构件为例, 对新建工程的耐久性设计进行演示。

算例以广东湛江地区的混凝土构件为例,进行耐久性设计计算。设定地区年平均温度23.1℃;构件的暴露区域为浪溅区;最小保护层厚度55 mm;设计寿命为50 a;其他参数为系统默认值。信息输入的界面如图2~4。系统计算推荐的混凝土配合比为水灰比0.35、掺合料为40%二级粉煤灰,使用此配合比的构件腐蚀发展期为46.1 a;腐蚀诱导期为3.3 a。如由用户自定义配合比,水灰比为0.35、掺合料为30%的矿渣,氯离子扩散系数为 $3.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ,系统计算其腐蚀发展期为43.5 a;腐蚀诱导期为4.8 a。计算结果界面如图5~6。由于使用该配合比的构件达不到设计寿命,需采用涂层附加措施,如图7所示。

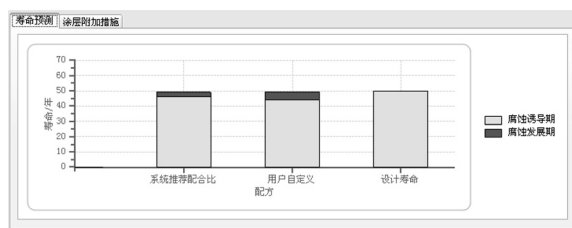


图6 计算结果图形显示



图7 建议涂层附加措施

## 4 结论

1) 该系统是海港工程混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断研究建立的氯盐环境下混凝土结构寿命预测模型的配套软件, 集成了大量的源自中国地区的工程调查数据, 与国际同类软件中最先进的Life-365软件相比, 增加了海洋环境下混凝土开裂阶段的计算模型, 使得计算结果更加准确, 为我国重大海工基础设施耐久性设计和寿命预测提供重要的技术支撑。

2) 该系统的开发采用面向对象编程语言 Visual C# .NET 和数据库技术, 有利于软件后续版本开发; 而采用 IMSL C# 数值分析函数库进行数值计算, 极大提高本系统计算的精确度和灵活性。

3) 根据目前国内外混凝土耐久性技术发展趋势, 该系统应需要不断进行扩充与完善:

①美国Life-365模型和欧洲的DuraCrete模型分别采用Fick第二定律的数值解和采用可靠度进行耐久性设计, 有别于该系统使用Fick第二定律的解析解。在后续版本应增加对Fick第二定律数值解和可靠度的数值计算, 以增加系统全面性。

②系统采用的推荐混凝土配合比数据库, 收集的配合比数据较少, 应不断收集实际工程或试验配合比数据, 增加推荐的合理性。

③继续收集我国海洋环境数据, 以充实系统的环境数据库, 使系统的计算结果更符合我国的海洋环境。



图2 项目信息输入界面



图3 环境信息设置界面



图4 构件信息设置界面



图5 计算结果

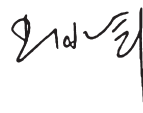
**参考文献:**

- [1] Tuutti K. Corrosion of steel in concrete[J]. Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982(4): 469-478.
- [2] Funahashi M. Predicting corrosion-free service life of a concrete structure in a chloride environmet[J]. Material Journal, 1990, 87(6): 581-587.
- [3] Thomas M P A, Bentz E C. Life-365: Computer program for predicting the service life and costs of reinforced concrete exposed to chlorides[M]. Fairfax, USA: Silica Fume Association, 2001.
- [4] 张奇, 李律松, 卫建伟. Visual C#数据库项目案例导航/数据库应用开发技术丛书[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 30-50.
- (本文编辑 武亚庆)

《水运工程》优秀论文评选

**评委点评:**

伴随工程建设对使用寿命的重视,混凝土结构的耐久性设计与寿命预测成为备受关注的热点。本文立足于我国20多年长期暴露试验、实体海港工程调查和室内试验,引入计算机分析技术,自主开发了海工混凝土结构耐久性寿命预测与健康诊断软件,建立了与耐久性寿命具有多元复杂关系的环境、材料、构件等设计参数的计算机专家处理系统,与国际同类技术相比,文章建立的软件系统更符合我国实际海洋环境和材料特点,操作简便,计算结果可信度大,实用性强,可用于新建海工混凝土结构的耐久性设计和在役海工混凝土结构的耐久性检测评估。



2012年12月

**评委简介:**

王胜年, 教高, 中交四航工程研究院有限公司总工程师。

主编及参编交通部规范6部, 获国家发明专利授权3项, 专著2部。作为项目第一完成人获1项国家科技进步二等奖、获得省部级科技奖励6项。主持和参与了国家及省部级科研项目10余项。