

混凝土使用寿命预测方法的研究 I ——理论模型

余红发^{1,2}, 孙伟¹, 鄢良慧², 麻海燕³

(1. 东南大学材料科学与工程系, 南京 210096; 2. 沈阳建筑工程学院材料科学与工程系, 沈阳 110015; 3. 东南大学土木工程学院, 南京 210096)

摘要: 基于 Fick 第二扩散定律, 推导出综合考虑混凝土的氯离子结合能力、氯离子扩散系数的时间依赖性和混凝土结构微缺陷影响的新扩散方程: $\frac{\partial c_f}{\partial t} = \frac{KD_0 t_0^m}{1+R} \cdot t^{-m} \cdot \frac{\partial^2 c_f}{\partial x^2}$, 建立了考虑多种因素作用下的混凝土氯离子扩散理论模型。该模型解决了长期以来 Fick 扩散理论在混凝土中的适应性问题, 并与 Clear 经验模型完全相符。用本理论模型预测混凝土结构在海洋环境中的使用寿命比用 Maage 模型更加合理。

关键词: 普通混凝土; 高性能混凝土; 使用寿命; 耐久性; 氯离子扩散系数; 模型

中图分类号: TU 528 **文献标识码:** A **文章编号:** 0454-5648(2002)06-0686-05

STUDY ON PREDICTION OF CONCRETE SERVICE LIFE I ——THEORETICAL MODEL

YU Hongfa^{1,2}, SUN Wei¹, YAN Lianghui², MA Haiyan³

(1. Department of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096; 2. Department of Materials Science and Engineering, Shenyang Architecture and Civil Engineering Institute, Shenyang 110015; 3. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: A new multi-component diffusion equation is formulated based on Fick's second law of diffusion and a theoretical model of chloride ion diffusion in concrete is proposed. Influencing factors of chloride binding capacity, time-dependence of chloride diffusion and micro-defects of concrete are taken into consideration. The results from the present model are in good agreement with those of Clear's experiential model. It is believed that the life expectancy of a concrete structure exposed to marine environment based on the present model would be more reasonable than that based on Maage's model.

Key words: ordinary portland concrete; high performance concrete; service life; durability; chloride diffusion coefficient; model

在正常使用条件下, 普通混凝土的使用寿命一般为 50 a, 高性能混凝土的使用寿命可能达到 100 a 以上。近年来, 国际上设计建造了许多著名的混凝土工程, 英国北海采油平台、日本明石跨海大桥和加拿大联盟大桥的设计寿命均为 100 a, 沙特阿拉伯至巴林高速公路的跨海大桥设计寿命 150 a, 荷兰东谢尔德海闸设计寿命 250 a^[1]。俄罗斯和日本有关专家^[2]研究指出混凝土结构的使用寿命可达到

600 多年。日本正在研究耐久性达 500, 700, 1000 a 的混凝土^[3]。当前, 混凝土结构的使用寿命设计已成为混凝土耐久性研究领域的新热点。

混凝土在氯离子环境下的使用寿命是指混凝土结构从建成使用开始到结构失效的时间过程, 它由诱导期、发展期和失效期组成。其中, 诱导期是指暴露一侧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; 发展期是指从钢筋表面钝化

收稿日期: 2002-01-25。修改稿收到日期: 2002-03-05。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(59938170); 国家自然科学基金项目(50178044); 青海省电力局 2001 年科技攻关项目(4200301011)。

作者简介: 余红发(1964~), 男, 博士研究生, 教授。

Received date: 2002-01-25. Approved date: 2002-03-05.

Biography: YU Hongfa(1964-), male, postgraduate for doctor degree, professor.

E-mail: yuhongfa@hotmail.com

膜破坏到混凝土保护层发生开裂所需的时间;失效期是指从混凝土保护层开裂到混凝土结构失效所需的时间。自20世纪80年代以来,国内外关于混凝土使用寿命的研究主要集中于诱导期,因此,混凝土的使用寿命一般指诱导期寿命,尽管Fick第二扩散定律可以用来预测使用寿命,但是至今仍未有建立完整的理论体系。在应用Fick定律时,Funahashi等^[4]考虑的因素比较简单,Prezzi等^[5]仅考虑混凝土对氯离子的结合能力,Mangat等^[6]仅考虑氯离子扩散系数的时间依赖性,而且都没有考虑混凝土材料在使用过程中内部微裂纹等结构缺陷的影响,所以,即使对于同一种混凝土,其预测结果也相差很大,而且与Clear^[7]确立的实际寿命公式不符,人们甚至对于Fick第二扩散定律在混凝土中的适应性提出质疑。为了完善混凝土使用寿命的预测理论体系,研究了氯离子环境下混凝土使用寿命的预测方法,建立了考虑多种因素作用下的氯离子扩散理论模型。

1 混凝土的氯离子扩散理论模型

假定混凝土是半无限均匀介质,氯离子在混凝土中的扩散过程是一维扩散,扩散时部分氯离子被混凝土结合,则其扩散过程符合Fick第二扩散定律^[8]

$$\frac{\partial c_t}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} D_t \frac{\partial c_t}{\partial x} \quad (1)$$

其中: t 是时间; x 是距混凝土表面的距离; D_t 是氯离子扩散系数; c_t 是距混凝土表面 x 处的氯离子总浓度,它由自由氯离子浓度 c_f 和结合氯离子浓度 c_b 组成,即 $c_t = c_f + c_b$ 。混凝土的氯离子结合能力定义为^[9]: $R = \frac{c_b}{c_f} = \frac{c_t - c_f}{c_f}$,它包括3个方面^[10]:氯离子被 C_3AH_6 化学结合成 $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 12H_2O$,进入CSH凝胶结构,被混凝土的内部孔隙表面物理吸附。在水化龄期为 t_0 时测定混凝土的氯离子扩散系数为 D_0 , t 时刻混凝土的氯离子扩散系数为 D_t ,则混凝土氯离子扩散系数与时间的依赖性如下^[6,11~13]: $D_t = D_0 \left(\frac{t_0}{t}\right)^m$, m 是实验常数,文献^[12]取值0.64。混凝土在使用过程中内部产生微裂纹等缺陷后加速了氯离子对混凝土的扩散作用,尤其对于高性能混凝土,其干燥收缩和自收缩更加明显,使混凝土的渗透性增加^[14],混凝土在这种条件

下的扩散系数 D_t 可用等效扩散系数 $D_e = KD_t$ 表示,式中, K 为混凝土氯离子扩散性能的劣化效应系数。经过严格地推导^[15],能够导出同时考虑混凝土氯离子结合能力、氯离子扩散系数的时间依赖性和结构缺陷影响的氯离子扩散新方程

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} = \frac{KD_0 t_0^m}{1+R} \cdot t^{-m} \cdot \frac{\partial^2 c_f}{\partial x^2} \quad (2)$$

上述方程的初始条件为 $t=0$, $x>0$ 时, $c_f=c_0$;边界条件为 $x=0$, $t>0$ 时, $c_f=c_s$ 。在此初始和边界条件下,得到混凝土氯离子扩散的理论模型如下

$$c_f = c_0 + (c_s - c_0) \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{\frac{KD_0 t_0^m}{(1+R)(1-m)} \cdot t^{1-m}}} \right] \quad (3)$$

其中: c_0 是混凝土内初始氯离子浓度; c_s 是混凝土暴露表面的氯离子浓度,等于暴露环境介质的氯离子浓度; erf 为误差函数, $\operatorname{erf} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt$ 。

2 扩散理论模型的讨论

2.1 理论模型的公式探讨

所建立的理论模型是Fick扩散定律的推广和修正,采用不同的假设便得到不同的模型公式。当不考虑混凝土的氯离子结合能力、氯离子扩散系数的时间依赖性和结构缺陷的影响,即 $K=1$, $c_0=0$, $R=0$, $m=0$ 时,模型简化为常见的简单形式

$$c_f = c_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{D_0 t}} \right) \quad (4)$$

当仅考虑混凝土的氯离子结合能力($K=1$, $c_0=0$, $m=0$),氯离子扩散系数的时间依赖性($K=1$, $c_0=0$, $R=0$)或混凝土结构缺陷的影响($c_0=0$, $m=0$, $R=0$)时,模型分别简化为公式(5),公式(6)或公式(7)

$$c_f = c_s \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{\frac{D_0 t}{1+R}}} \right] \quad (5)$$

$$c_f = c_s \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{\frac{D_0 t_0^m}{1-m} \cdot t^{1-m}}} \right] \quad (6)$$

$$c_f = c_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{KD_0 t}} \right) \quad (7)$$

当同时考虑混凝土的氯离子结合能力和氯离子扩散系数的时间依赖性($K=1$, $c_0=0$),氯离子结合能力和结构缺陷的影响($c_0=0$, $m=0$)或氯离

子扩散系数的时间依赖性和结构缺陷的影响($c_0 = 0$, $R = 0$) 时, 模型分别简化为公式(8)、公式(9)或公式(10)

$$c_f = c_s \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\frac{D_0 t_0^m}{(1+R)(1-m)} \cdot t^{1-m}}} \right] \quad (8)$$

$$c_f = c_s \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\frac{KD_0 t}{1+R}}} \right] \quad (9)$$

$$c_f = c_s \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\frac{KD_0 t_0^m}{1-m} \cdot t^{1-m}}} \right] \quad (10)$$

2.2 所提出的理论模型与 Clear 经验模型的比较

Clear^[7]在 1976 年根据实验和工程应用发展了一个计算混凝土中钢筋开始腐蚀时间的经验模型

$$t = \frac{129x^{1.22}}{c_s m(w)/m(c)} \quad (11)$$

其中: t 是混凝土中钢筋开始锈蚀的时间; x 是混凝土的保护层厚度; c_s 是暴露环境介质的氯离子浓度($\times 10^{-6}$); $m(w)/m(c)$ 是混凝土的水灰比。该经验模型曾成功地用于海洋油罐和河堤等大型混凝土工程使用寿命的设计和验证, 取得了理想的效果。

图 1 示出了用公式(3)~公式(11)计算普通混凝土和高性能混凝土在海洋环境中不同深度断面的相对氯离子浓度分布。计算时, 海水的氯离子浓度 $c_s = 1.938\%$ ^[10], 混凝土的临界氯离子浓度 $c_{cr} = 0.05\%$ ^[4]。结果表明, 只有同时考虑混凝土的氯离子结合能力、氯离子扩散系数的时间依赖性和混凝土结构微缺陷影响的理论公式(3)与 Clear 实际经验公式完全相符。

2.3 本理论模型与 Maage 理论模型的关系

Maage 等^[13]基于 Fick 第二扩散定律、现有工程结构和实验结果, 提出了一个预测现有混凝土结构使用寿命的实际模型

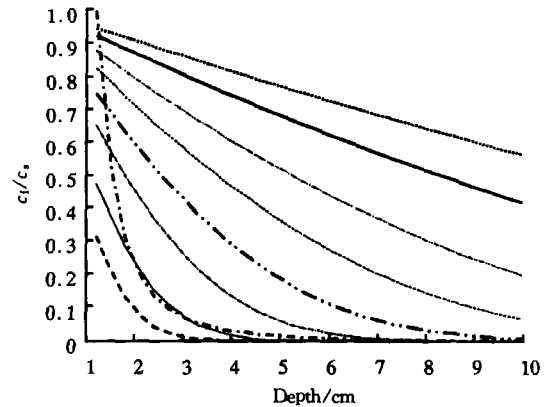
$$t = t_0 \left(\frac{x}{\zeta \sqrt{t_0 D_0}} \right)^{\frac{2}{1-m}} \quad (12)$$

其中, $\zeta = 2\operatorname{erfc}^{-1} \left(\frac{c_{cr} - c_0}{c_s - c_0} \right)$, 经过整理得到其等价公式如下:

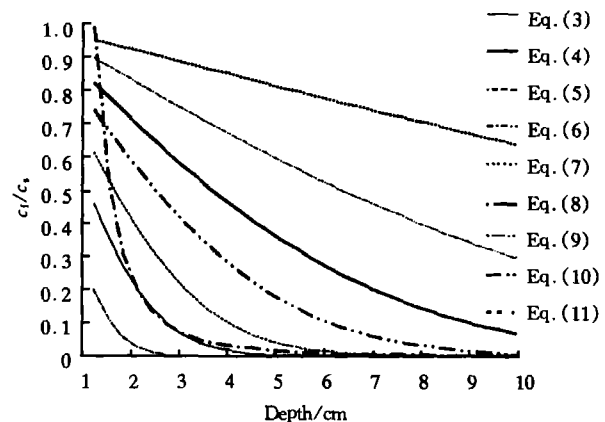
$$c_{cr} = c_0 + (c_s - c_0) \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_0 t_0^m t^{1-m}}} \right] \quad (13)$$

由此可见, Maage 等提出的实际模型也是一种理论模型, 它实质上是本工作所建立的理论模型的特例。根据文献[13]提供的不同水胶比硅灰混凝土

的氯离子扩散系数值, 用 Maage 模型预测保护层厚度 45 mm 的高性能混凝土结构的使用寿命能达到几万年以上, 而用文中的理论模型预测则不存在这个问题, 其寿命仅有几百年, 这充分说明所提出的理论模型更加切合实际。



(a) OPC, $D_0 = 0.15 \text{ cm}^2/\text{a}$, $t = 50 \text{ a}$, $K = 2.0$, $R = 4$



(b) HPC, $D_0 = 1.5 \text{ cm}^2/\text{a}$, $t = 100 \text{ a}$, $K = 18$, $R = 5$

图 1 在海洋环境中普通混凝土和高性能混凝土不同深度断面的相对氯离子浓度分布

Fig. 1 Chloride concentration profiles in OPC and HPC for exposure to seawater

OPC—Ordinary portland concrete, $m(w)/m(c) = 0.53$;

HPC—High performance concrete, $m(w)/m(c) = 0.27$, dosage of fly ash is 30% in mass.

2.4 所提出的理论模型的参数取值规律

所建立的理论模型中, 参数 m , K 和 R 的取值问题, 关系到混凝土使用寿命的预测结果。

(1) 关于参数 m 的取值 Mangat 等^[6]测定龄期 180 d 内的混凝土 m 为 0.52; Thomas 等^[11]测定龄期 8 a 内的粉煤灰混凝土 m 为 0.70; 文献[12]对于龄期 37 a 内的混凝土取值为 0.55, 调查 100 a 内的混凝土 m 为 0.64。鉴于高性能混凝土

的使用寿命要达到 100 a 或更长,故用本文理论模型预测混凝土的使用寿命时取 $m = 0.64$ 是比较合理的。

(2) 关于参数 R 的取值 混凝土的氯离子结合能力对混凝土使用寿命有非常显著的影响。混凝土对氯离子的结合,除了 C_3A 和 C_4AF 的化学结合^[10]外,CSH 凝胶结构对氯离子的固溶效应及其内表面对氯离子的物理吸附以及混凝土孔壁对氯离子的物理吸附作用^[16, 17]也是很重要的。文献[8]提供了 Weiger 在 1983 年报道的不同水泥品种的混凝土氯离子结合能力,经过计算,在氯离子含量占水泥质量 2.2% 以内,普通硅酸盐水泥混凝土的 $R = 2.14$,粉煤灰水泥混凝土的 $R = 4.5$,矿渣水泥混凝土的 $R = 14.7$ 。Suryavashi^[17]测定了在氯离子含量占水泥的质量分数为 1% 和 1.75% 时,普通水泥砂浆的 $R = 2.85 \sim 5.25$ 和 $1.94 \sim 2.33$ 。混凝土的氯离子结合能力主要受水泥品种、水灰比、掺合材品种和掺量等因素的影响。水泥中 C_3A 和 C_4AF 含量越高、水灰比越小混凝土的氯离子结合能力越强,同时,掺活性混合材的混凝土氯离子结合能力高,其大小依次是硅灰混凝土、矿渣混凝土、粉煤灰混凝土。混合材掺量越大混凝土的氯离子结合能力也越强,高强高性能混凝土的氯离子结合能力大于普通混凝土。综合国内外的研究,参数 R 的基本取值规律如下:对于普通水泥混凝土, $R = 2 \sim 4$;对于高性能水泥混凝土, $R = 3 \sim 15$,其具体取值问题将于另文发表。

(3) 关于参数 K 的取值 混凝土氯离子扩散性能的劣化效应系数反映了混凝土结构内部微裂纹等缺陷对混凝土使用寿命的影响。在干燥条件、温度应力、冻融循环和化学腐蚀等外界损伤条件下,或者在混凝土内部发生碱骨料反应以及高性能混凝土发生自收缩等内在条件下,混凝土会产生微裂纹等缺陷,使其渗透性提高,从而使其氯离子扩散速度加快。混凝土氯离子扩散性能的劣化效应系数 K 主要受水胶比、骨料品种、掺合材、暴露环境条件和龄期等因素的影响。研究表明,水胶比越小, K 值越大;轻骨料混凝土的 K 值大于普通混凝土;掺活性混合材的混凝土 K 值变小;龄期越长混凝土 K 值越大;暴露环境条件越恶劣混凝土 K 值越大。在海洋环境中,混凝土 K 值大小顺序依次是浪溅区、水下区和大气区。混凝土在除冰盐条件下的 K 值大于在海洋环境中的 K 值。高性能混凝土的 K 值大于普通混凝土。Pigeon 等^[14]测定了水胶比

$m(w)/m(c) = 0.25 \sim 0.45$ 普通混凝土和高性能混凝土在干燥条件下的 K 值为 $1 \sim 25$ 。参数 K 的基本取值规律如下:对于普通水泥混凝土, $K = 1 \sim 14$;对于高性能水泥混凝土, $K \geq 6$,其具体取值问题将于另文发表。

3 结 论

(1) 在 Fick 第二扩散定律的基础上,引进混凝土的氯离子结合能力概念,充分考虑混凝土氯离子扩散系数的时间依赖性以及混凝土材料在使用过程中内部结构缺陷的影响,经过严密的理论推导,建立了考虑多种因素作用下的混凝土氯离子扩散理论模型。

(2) 所建立的理论模型是 Fick 扩散定律的推广和修正。无论对于普通混凝土,还是对于高性能混凝土,在常规保护层范围内,该理论模型与国外曾经广泛采用的 Clear 经验模型完全相符,解决了长期以来 Fick 扩散理论与混凝土的实际寿命不相符的问题。

(3) Maage 等提出的实际模型实质上是文中提出的理论模型的特例。但是,用 Maage 模型预测高性能混凝土结构的使用寿命能达到几万年以上,难以令人信服,而用文中所提出的理论模型预测高性能混凝土结构的使用寿命则更加切合实际。

(4) 确定了所提出的理论模型中参数 m , K 和 R 的取值规律。

参考文献:

- [1] 洪定海(HONG Dinghai). 大掺量矿渣微粉高性能混凝土应用范例[J]. 建筑材料学报(J Build Mater), 1998, 1(1):82.
- [2] 姚启均 编译(YAO Qijun ed and trans). 钢筋混凝土结构耐久性预测[J]. 混凝土与水泥制品(Chin Concr Cem Produc), 1995(2):58—59.
- [3] 谷川恭雄. 日本名古屋大学谷川恭雄教授来华讲学报告[R]. 沈阳:沈阳建筑工程学院(Shenyang: Shengang Architecture and Civil Engineering University), 1999.
- [4] FUNAHASHI M. Predicting corrosion—free service life of a concrete structure in a chloride environment [J]. ACI Mater J, 1990, 87(6): 581—587.
- [5] PREZZI M, GEYSKENS P, MONTEIRO P J M. Reliability approach to service life prediction of concrete exposed to marine environments [J]. ACI Mater J, 1996, 93(6): 544—552.
- [6] MANGAT P S, LIMBACHIYA M C. Effect of initial curing on chloride diffusion in concrete repair materials [J]. Cem Concr Res, 1999, 29(9): 1 475—1 485.
- [7] CLEAR K C. Time-to-corrosion of reinforcing steel in concrete

- slabs [A]. Performance After 830 Daily Salt Applications (3) [R]. Report No. FHWA/RD-76/70. Washington, D C: Federal Highway Administration, 1976. 59.
- [8] 洪定海(HONG Dinghai). 混凝土中钢筋的腐蚀与保护(Corrosion and Protection of Reinforcement in concrete)[M]. 北京: 中国铁道出版社(Beijing: China Railway Press), 1998. 344 页.
- [9] 王新友, 李宗津(WANG Xinyou, *et al*). 混凝土使用寿命预测的研究进展[J]. 建筑材料学报(J Build Mater), 1999, 2(3): 249—256.
- [10] WEE T H, WONG S F, SWADDIWUDHIPONG S, *et al*. A prediction method for long-term chloride concentration profiles in hardened cement matrix materials [J]. ACI Mater J, 1997, 94(6): 565—576.
- [11] THOMAS M D A, BAMFORTH P B. Modelling chloride diffusion in concrete—effect of fly ash and slag [J]. Cem Concr Res, 1999, 29(4): 487—495.
- [12] MAAGE M, HELLAND S, CARLSEN J E. 暴露于海洋环境的高性能混凝土中的氯化物渗透[A]. 见: SOMMER H 编. 高性能混凝土的耐久性(Durability of High Performance Concrete)[M]. 冯乃谦, 丁建彤, 张新华, 等译(FENG Naiqian, *et al* trans). 北京: 科学出版社(Beijing: Science Press), 1998. 118—127.
- [13] MAAGE M, HELLAND S, POULSEN E, *et al*. Service life prediction of existing concrete structures exposed to marine environment [J]. ACI Mater J, 1996, 93(6): 602—608.
- [14] PIGEON M, GARNIER F, PLEAU R, *et al*. Influence of drying on the chloride ion permeability of HPC [J]. Concr Int, 1993, 15(2): 65—69.
- [15] 余红发, 孙 伟, 麻海燕, 等(YU Hongfa, *et al*). 混凝土在其它耐久性因素共同作用下的氯离子扩散方程的研究[J]. 建筑材料学报(J Build Mater), 2002, 5(3): 240—247.
- [16] 余红发(YU Hongfa). 抗盐卤腐蚀的水泥混凝土的研究现状与发展方向[J]. 硅酸盐学报(J Chin Ceram Soc), 1999, 27(2): 237—245.
- [17] SURYAVASHI A K. Pore solution analysis of normal portland cement and sulphate resistance portland cement mortars and other influence on corrosion behaviour of embedded steel[A]. In: SMAMY R N ed. Proceeding on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete[C]. UK: University of Shellfield, 1994. 482—2990.

浙江丰利粉碎设备问鼎浙江名牌产品

浙江丰利公司属国家重点高新技术企业,技术力量雄厚,拥有完善的制造设备及测试设施。组建有浙江省粉体工程技术研究开发中心,具有承接项目设计、开发、制造及成套设备的安装、调试一条龙“交钥匙”工程的能力。

日前,浙江名牌产品认定委员会发布了 2002 年第 1 号公告,浙江丰利粉碎设备有限公司生产的“驼峰牌”特种粉碎设备被认定为“浙江名牌产品”。

这是浙江名牌产品认定委员会在企业规模、市场占有率、用户满意度、社会效益、企业发展趋势等多方面进行综合考核后,评出的浙江粉碎工程行业中的名牌产品。

吴宏富稿