

文章编号 1000 5013(2004) 04 0392 04

氯离子侵蚀下钢筋初锈时间的计算模型

施养杭^① 罗 刚^②

(① 华侨大学土木工程系, 福建 泉州 362021; ② 中国核工业部上海设计院, 上海 200000)

摘要 基于钢筋锈蚀的机理, 综合考虑影响钢筋锈蚀的各种主要因素, 提出钢筋初锈时间的概念, 建立相应的计算模型. 经实例验证, 该模型可行、有效, 计算结果能反映实际工程情况. 结果有利预测混凝土中钢筋的初锈时间, 以便及时对混凝土结构进行健康诊断、防止耐久性失效.

关键词 氯离子, 锈蚀机理, 钢筋初锈时间, 计算模型, CLCON 程序, 健康诊断

中图分类号 TU 511. 3⁺ 20. 3 **文献标识码** A

钢筋锈蚀, 是影响钢筋混凝土结构耐久性和使用寿命的重要因素. 工程实践证明^[1], 已有大量混凝土结构因钢筋腐蚀而产生严重破坏, 导致耐久性失效, 造成严重的经济损失. 根据研究和无损检测结果可以得到^[1], 反映钢筋锈蚀程度可用阳极电流密度、钢筋失重速率、截面损失速率和锈蚀深度等指标来表示. 但这些指标均表明钢筋已发生锈蚀, 对于钢筋何时开始锈蚀则无从体现. 这对于及时对混凝土结构进行健康诊断和防治极为不利. 为此, 本文提出钢筋初锈时间的计算模型.

1 钢筋锈蚀机理

新鲜混凝土中具有明显的高碱性环境, 其 pH 值通常大于 12, 使得混凝土中钢筋发生钝化作用^[2]. 钝化钢筋表面形成一层抗侵蚀的钝化膜, 保护钢筋不易遭受有害介质的锈蚀. 倘若混凝土的密实度不足, 为氯离子和水汽等有害介质提供进入混凝土的通道, 并在其中发生中和作用. 则会将引起 pH 值下降, 从而破坏钢筋表面的钝化膜, 导致钢筋锈蚀, 严重时将危及构件强度和结构安全. 按引起钢筋锈蚀的原因, 可把钢筋锈蚀分为电化学锈蚀、化学锈蚀和应力锈蚀等形式^[3]. 混凝土中钢筋锈蚀必须具备 3 个条件^[4,5]. (1) 钢筋表面存在电位差, 构成腐蚀电池. (2) 钢筋表面钝化膜遭到破坏, 钢筋处于活性状态. (3) 钢筋表面存在有离子扩散和反应所需的水份和氧气. 混凝土中钢筋锈蚀一般为电化学锈蚀^[2,3], 主要的有害介质为二氧化碳和氯离子. 它们对混凝土本身不会引起严重破坏, 但对钢筋的钝化膜具有致命的破坏作用. 所以, 混凝土中钢筋的锈蚀机理, 主要反映在混凝土的碳化和氯离子的侵蚀, 且以氯离子的侵蚀最为严重和危险.

2 初锈时间的影响因素及氯离子临界浓度的确定

钢筋初锈时间指混凝土中钢筋周围的氯离子浓度达到临界浓度所需要的时间. 其影响因素很多, 主要和氯离子侵入混凝土速度的快慢有直接关系, 如图 1 所示. 在钢筋周围混凝土孔隙液体中, 如果氯离子浓度达到引起钢筋去钝所需的浓度, 则称之为氯化物的临界浓度. 它是预测钢筋初锈时间的关键参数. 研究结果表明, 氯离子临界浓度与混凝土中的水泥类型、材料配合比、水灰比, 以及混凝土中的温度和湿度、孔隙结构等诸多因素有关, 如图 2 所示. 但是, 目前尚无准确的计算模型. 氯离子临界浓度用氯离子质量占水泥质量, 或者用氯离子质量占混凝土质量的质量分数表示. 现根据钢筋锈蚀的概率, 可确

收稿日期 2004 03 21

作者简介 施养杭 (1961-), 男, 副教授, 在职博士, 主要从事结构寿命与工程抗震的研究. E-mail: d. s666@ 163. com

基金项目 建设部国家混凝土规范第 6 批科研基金资助项目 (GBKY6001)

©1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

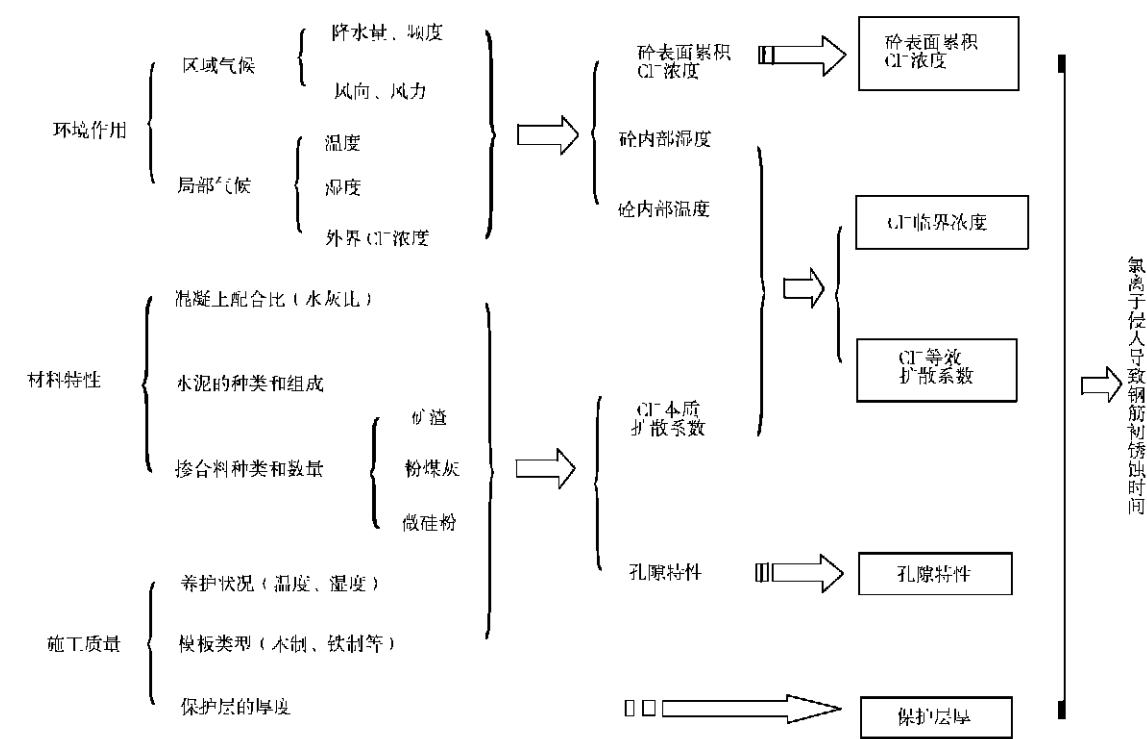


图 1 钢筋初锈时间的影响因素

定相应氯离子临界浓度范围, 如表 1 所示. 表中氯离子临界浓度是用氯离子质量与混凝土质量的百分比

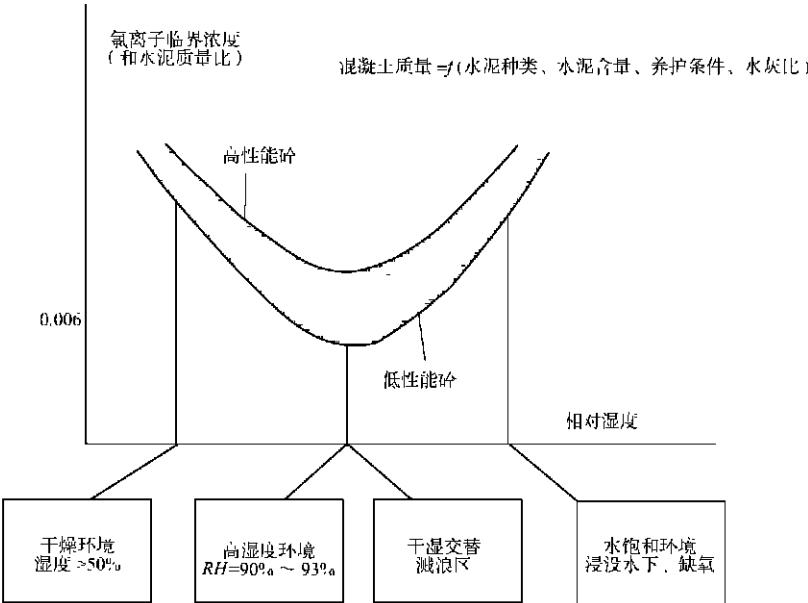


图 2 氯离子临界浓度随混凝土性能和环境变化(CEB)

表示. 在本研究中, 取氯离子临界浓度为 0.000 7.

表 1 氯离子浓度与钢筋锈蚀可能性关系

氯离子临界浓度	> 0.003 6	0.001 8~ 0.003 6	0.000 7~ 0.001 8	< 0.000 7
钢筋锈蚀可能性	肯定	很可能	可能	不可能

3 氯离子侵入混凝土及钢筋初锈时间的计算模型

根据构件实际边界氯离子浓度的累积变化, 以及扩散系数随时间和温度改变的特点, 建立氯离子侵入混凝土的计算模型^[6]. 即

$$-r \cdot C_{i-1,j+1} + (1+2r) \cdot C_{i,j+1} -$$
$$r \cdot C_{i+1,j+1} = C_{i,j}, \quad i = 1, 2, \Lambda, m1,$$

(1)

上式中, $r = D_F \cdot \tau / h^2$, $C(x_i, t_j)$ 为距构件表面深度 $i \cdot h$ 处, 时刻 $j \cdot \tau$ 的氯离子浓度; $D_F = D_{\text{ref}}(w/c) \cdot f_1(T) \cdot f_2(t) \cdot f_3(h)$ 为含多因素的氯离子扩散系数, D_{ref} 为基本氯离子扩散系数, $f_1(T)$ 为温度影响系数, $f_2(t)$ 为时间影响系数, $f_3(h)$ 为相对湿度影响系数. 式(1)是 $C_{1,j+1}$, $C_{2,j+1}$, \dots , $C_{m-1,j+1}$ 的三对角线方程组. 由边界条件 $C_{i,0}$ 求出 $C_{i,1}$, $C_{i,2}$, \dots , $C_{i,n}$, 即得不同暴露时间氯离子浓度在混凝土断面上的分布. 根据式(1)并考虑各种影响因素, 编制 CLCON 程序. 由此当已知混凝土配合比(水灰比、粉煤灰或矿渣掺量)和工作环境(温度、湿度和表面氯离子累积浓度)时, 可求出任一指定暴露时间, 混凝土中沿深度方向氯离子浓度的分布, 以及在指定保护层深度处氯离子浓度达到临界值所需的时间(即钢筋发生初锈所需的时间 t_1). 该程序的计算流程, 如图 3 所示. 程序计算中, 深度的计算步长为 5 mm, 时间的计算步长为

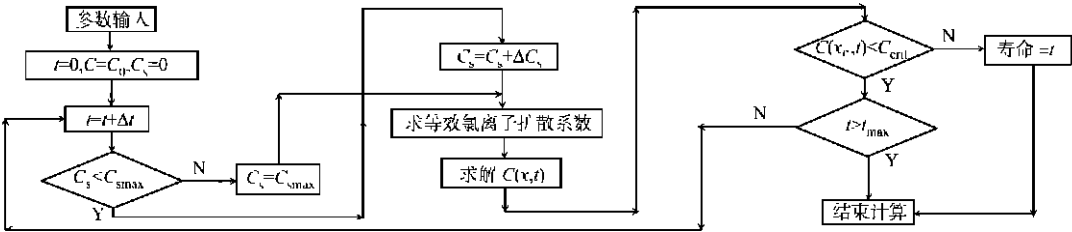


图 3 CLCON 计算框图

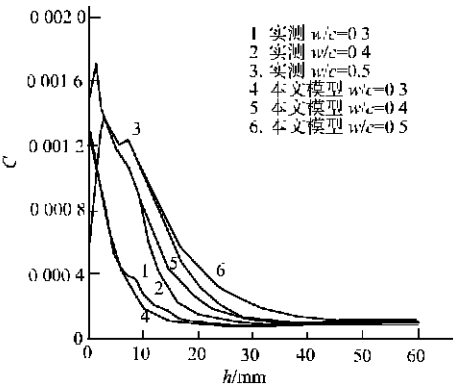
30 d, 在每个时间循环内, 对混凝土表面氯离子浓度 C_s 和扩散系数的影响系数 $f_1(T)$, $f_2(t)$, $f_3(h)$ 进行计算, 求出在该暴露时间下沿深度方向的氯离子浓度 $C(x, t)$. 根据保护层深度处氯离子浓度 $C(x_c, t)$ 超过临界浓度 C_{crit} 所需的时间 t , 求得钢筋发生初锈所需的时间. 根据程序运行效率和结果, 本文的计算模型具有 3 个优点: (1) 可考虑混凝土中初始氯离子浓度 C_0 . (2) 可随时间增长对扩散系数及时修正. (3) 在每次计算中既可得到钢筋初锈时间, 又可求得不同暴露时间下沿深度方向氯离子浓度的分布.

4 实例验算

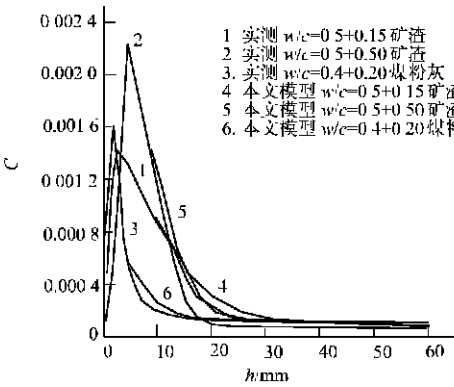
为检验本计算模型, 经多个实例演算, 结果均具有很高的吻合程度. 现加以说明. 实测数据参见文[7]. 根据 CLCON 程序运行规则, 输入相关参数, 如表 2 所示. 经运算得到相应结果, 如图 4, 5 所示. 从

表 3 输入的参数

试件编号	1	2	3	4	5	6
水灰比	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4
外掺料	—	—	—	0.15 的矿渣	0.50 的矿渣	0.20 的矿渣
C_0	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 8	0.000 6	0.000 1
h_0/mm	0	10	10	10	10	5
t/d	570	570	570	570	570	570
$K/(\%) \cdot \text{d}^{-1}$	0.000 21	0.000 15	0.000 18	0.000 19	0.000 24	0.000 09



(a) 不同水灰比



(b) 不同外掺料

图 4 实测数据与本文计算模型结果比较图

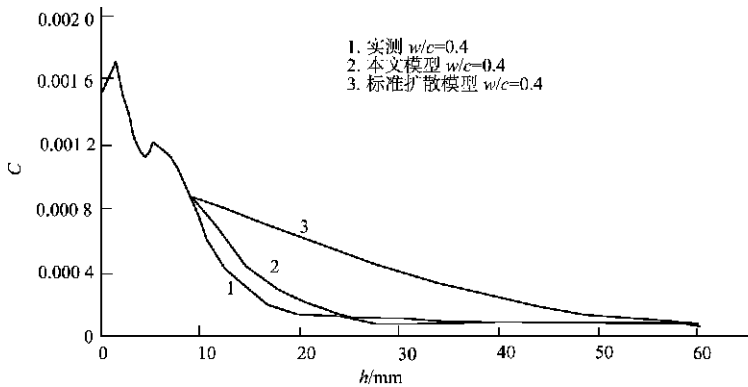


图 5 水灰比为 0.4 的实测数据与两种计算模型结果比较图

图 5 可见, 计算结果与实测数据相比, 能较好地反映不同水灰比和外掺料对氯离子侵入过程的影响.

5 结束语

本文从钢筋锈蚀机理和多种影响因素出发, 建立预测钢筋初锈时间计算模型, 编制计算程序. 经验证, 该模型实用性强, 计算结果符合实际情况. 对深入研究钢筋锈蚀规律及其对结构功能影响, 均具有重要的现实意义.

参 考 文 献

1 罗 刚, 施养杭. 钢筋混凝土构件中钢筋锈蚀量的无损检测方法[J]. 福建建筑, 2002, 79(4): 55~ 57
2 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 93~ 99
3 周新刚. 混凝土结构的耐久性与损伤防治[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1999. 46~ 64
4 Bazant Z. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures application[J]. Journal of Structural Division, ASCE, 1979, 105(6): 1 155~ 1 166
5 Liu Y B. Modeling the time to corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structure[J]. ACI Materials Journal, 1998, (6): 1 026~ 1 035
6 施养杭, 罗 刚. 有限差分法的氯离子侵入混凝土的计算模型[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2004, 25(1): 58~ 61
7 Sulaiman G. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members[J]. ACI Journal Proceedings, 1990, (2): 275~ 283

A Computation Model for Computing Initial Corrosion Time
of Reinforcing Bar Suffering from Chlorion Erosion

Shi Yankang^① Luo Gang^②

(① Dept. of Civil Eng., Huaqiao Univ., 362021. Quanzhou, China;
② Shanghai Designing Inst., Ministry of Nuclear Industry, 200000, Shanghai, China)

Abstract Based on the mechanism of corrosion of reinforcing bar, the authors consider chlorion corrosion and some other factors influencing corrosion of reinforcing bar; and initiate for the first time the concept of initial corrosion time; and establish computation model correspondingly. The model is verified by example to be workable and efficacious, the reckoning reflects actual engineering situation. This is of important significance for calculating initial corrosion time of reinforcing bar in concrete, for timely examining the health of concrete structure, and for preventing ineffectiveness of its durability.

Keywords chlorions, mechanism of corrosion, initial corrosion time of reinforcing bar, computation model, CLCON program, health examination