

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2010.05.003

人工气候环境下水工混凝土钢筋初始锈蚀时间预测

王梁英,刘华挺,张俊芝,周建民,郑辉

(浙江工业大学建筑工程学院,浙江 杭州 310014)

摘要 根据人工气候环境下的混凝土侵蚀试验测得的混凝土中氯离子质量分数,分别研究了腐蚀 24 d、40 d、80 d、120 d 和 160 d 后混凝土的氯离子扩散参数,基于 Fick 第二定律和 Monte-Carlo 法模拟了混凝土中钢筋的初始锈蚀时间。结果表明,在人工气候环境下混凝土保护层有效厚度对水工混凝土钢筋初始锈蚀时间的影响较大。

关键词 混凝土;人工气候环境;氯离子;钢筋;初始锈蚀时间

中图分类号:TV431 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2010)05-0009-03

Prediction of initial corrosion time of steel bars in hydraulic concrete under artificial climate environment//WANG Liang-ying, LIU Hua-ting, ZHANG Jun-zhi, ZHOU Jian-min, ZHENG Hu(College of Architecture and Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract : According to the concentrations of chloride ions in corrosion tests on concrete under artificial climate environment, the diffusion parameters of concrete after corrosion of 24, 40, 80, 120 and 160 d were studied. The initial corrosion time of steel bars in concrete was simulated based on the Fick's second law by use of the Monte-Carlo method. The results show that the effective thickness of concrete protective layer has great influence on the initial corrosion time of steel bars in hydraulic concrete under the design artificial climate environment.

Key words : concrete; artificial climate environment; chloride ion; steel bar; initial corrosion time

已有研究表明,钢筋开始锈蚀后将在较短时间内致使保护层开裂破坏^[1-2],即标志着混凝土构件达到了其耐久性寿命。所以,混凝土构件的耐久性寿命研究多是关于钢筋表面的氯离子质量浓度达到钢筋锈蚀临界浓度的时间预测^[3-4]。

实际上,自然环境下混凝土中氯离子的迁移是一个复杂的随机过程,一般试验模拟氯离子的扩散性能与自然腐蚀有较大的差异^[5],现有的室内模拟试验方法或多或少地存在一定的局限性^[6],氯离子的长期扩散性及初始锈蚀时间的分析需要根据自然环境下的侵蚀情况进行修正^[7]。

笔者根据人工气候环境下的腐蚀试验水工混凝土中氯离子分布的结论,以 Fick 第二定律和 Monte-Carlo 法为基础,分析该环境下水工混凝土钢筋的初始锈蚀时间,并研究该环境下钢筋初始锈蚀时间的主要影响因素。

1 人工气候环境氯离子侵蚀试验

1.1 试验原材料及配合比

人工气候环境下的腐蚀试验,混凝土采用钱潮牌 P·O32.5R 水泥,所用骨料的最大粒径为 40 mm,砂子采用河沙,其细度模数为 2.7,拌和用水及养护用水为当地自来水。为模拟既有混凝土(水闸闸墩),按推定水闸的闸墩混凝土水灰比为 0.6^[5]试验,不掺加任何外加剂。粗骨料的最大粒径为 40 mm,所有试件配合比的砂率均采用 32.0%,混凝土的配合比(质量比)为 $m_C:m_S:m_G:m_W=1.00:1.95:4.15:0.61$,坍落度为 5~10 cm。按照规范^[8] 20℃静水养护 28 d 的实测标准混凝土试块的抗压强度为 20 MPa^[5]。

1.2 试验方法及试件氯离子质量分数

本次试验考虑温度、湿度、氯盐浓度 3 个环境因素。试验中设置了 4 个环境条件,相对应于该闸所处位置的春夏秋冬四季。考虑到需要加速腐蚀,试验时气温采用该位置季平均气温的 2 倍。参考背景

工程的气象资料,人工气候的温度与湿度循环在春夏秋冬四季分别为(温度/相对湿度):34℃/78%,53℃/80%,34℃/80%和12℃/75%^[5]。根据上述配合比制作直径100mm、高度60mm的混凝土试块,每个腐蚀时间各3个试块。考虑到水工混凝土的实际养护时间一般较长,故试验混凝土标准养护28d后在自然环境下再养护28d,即制作56d后在底边及四周涂抹环氧树脂,以保证其向上面为氯离子的侵蚀面。

试验中用5%的盐雾从上部向下喷洒,以加速腐蚀。结合闸墩混凝土取样位置潮水位的波动特征,设置喷雾腐蚀时间为2h,干燥腐蚀时间为46h。按照上述设定的环境条件依次循环,相当于经历4个气候环境后为1个大循环(即8d为1个大循环)。

上述试件分别经过24d、40d、80d、120d和160d的腐蚀后,将混凝土按2mm的规格磨成粉末,置于烘箱内2h之后取出冷却至室温待用。混凝土中自由氯离子质量分数用美国Thermo 720A酸度计测定。其中,腐蚀160d的混凝土为相同环境和配合比试验构件(梁)在支座处(未受力状态)的芯样^[5]。

测得5个腐蚀时间段混凝土中自由氯离子质量分数均值如图1所示,其中160d的为腐蚀试验的梁支座端点的混凝土。

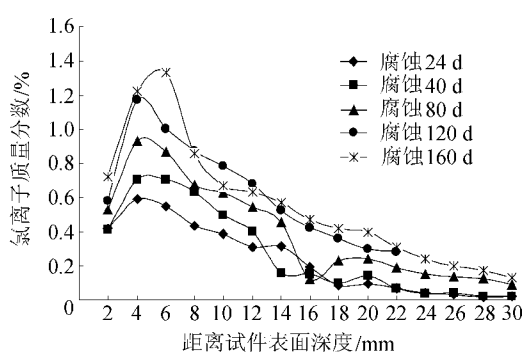


图1 混凝土中的氯离子质量分数随深度变化情况

分析结果表明,人工气候环境下的混凝土表面存在明显的对流区,其对流区的厚度均值随腐蚀时间的增加而增加。因此,人工气候环境下的氯离子侵蚀试验结果与自然环境下侵蚀的特征类似^[5,7]。

2 混凝土氯离子扩散参数与钢筋初始锈蚀时间预测

2.1 混凝土氯离子扩散参数

假设一维状态下的氯离子扩散,其扩散系数和混凝土表面氯离子质量分数为常数,在稳定扩散区以Fick第二定律描述其扩散过程,即有确定性的氯离子的扩散方程如下^[3]:

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

式中: C_0 为混凝土初始氯离子质量分数,%; C_s 为混凝土表面的氯离子质量分数,%; D 为混凝土的扩散系数, m^2/s ; $C_{x,t}$ 为时刻 t 距离混凝土表面 x 处的氯离子质量分数,%; t 为混凝土暴露于氯离子侵蚀环境的时间,s; $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为误差函数。

以式(1)用最小二乘法拟合混凝土扩散参数,侵蚀时间取试验的腐蚀时间,将混凝土中各深度处的坐标值($x_i, C_{x_i,t}$)代入式(1)。

由于人工环境下靠近混凝土表面的氯离子质量分数并不符合扩散规律,则从混凝土表面开始依次排除不符合的数据,用其余的数据拟合式(1),要求以相关系数 R^2 尽可能接近1作为拟合优度的检验,如果不满足该条件则在拟合过程中继续从混凝土表面依次排除数据,直到对 R^2 满意。这个过程可以识别对流区和扩散区^[7]。在对流区,数据偏离了拟合曲线;在扩散区,氯离子主要通过扩散传输。

因此,在排除对流区的数据后,以对流区和扩散区界面为扩散表面来拟合同下方程:

$$C_{x,t} = C_0 + (C_1 - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - X_1}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (2)$$

式中: C_1 为对流区与扩散区界面处氯离子的质量分数; X_1 为对流区厚度。

由于试验混凝土中均未掺加任何外加剂,故混凝土 $C_0 = 0$,式(2)即为

$$C_{x,t} = C_1 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - X_1}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (3)$$

2.2 钢筋初始锈蚀时间预测的 Monte-Carlo 法

以氯离子扩散系数为常数的初始锈蚀时间预测,利用排除对流区氯离子质量数值的扩散参数,则氯离子扩散自对流区与扩散区的界面开始模拟。对式(3)进行变换,可得

$$t_i = \frac{(x - X_1)^2}{4D} \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(\frac{C_1 - C_{\text{crit}}}{C_1} \right) \right]^2 \quad (4)$$

式中: t_i 为钢筋初始锈蚀时间; C_{crit} 为临界氯离子质量分数。

在已知式(4)中各参数随机特性的基础上,可利用 Monte-Carlo 法进行 t_i 的预测模拟计算。

根据上述方法,可对人工气候环境下5个腐蚀时间段氯离子质量分数均值进行扩散参数的拟合。设表面氯离子质量分数及扩散系数均为常量,临界氯离子质量分数均值为0.18%,其标准差取为0.02%,服从对数正态分布^[7]。混凝土保护层厚度的标准差取为5mm。在上述条件下,可计算不同保护层厚度均值时的 t_i 。

用 Monte-Carlo 法模拟 20 000 次 ,求得不同保护层厚度均值时人工气候环境下不同腐蚀时间的水工混凝土中 t_i 的均值 $\bar{t}_i$ (表 1)。

表 1 人工气候环境下的 $\bar{t}_i$

腐蚀时间/d	$\bar{\delta}$ /mm	$\bar{t}_i$ /d
24	20	27.0
24	25	43.0
40	20	42.1
40	25	66.5
80	20	49.2
80	25	77.9
120	20	53.0
120	25	83.9
160	20	62.9
160	25	103.6

注 $\bar{\delta}$ 表示混凝土保护层厚度均值。

从表 1 可知 ,随着混凝土保护层有效厚度(均值)的增加 ,各腐蚀时间段的混凝土钢筋初始锈蚀时间均值也延长 ,与已有结论一致^[3] ,外界氯离子质量分数保持不变时 ,腐蚀前期氯离子扩散系数较大 ,在混凝土内部保留一定的氯离子质量分数值 ,而后期氯离子扩散系数较小 ,氯离子质量分数基本保持不变 ,其钢筋初始锈蚀时间均值相对增加。另外 ,根据计算 ,钢筋初始锈蚀时间的标准差随腐蚀时间的增加而变大 ,但是变异系数较为稳定。

经过检验 ,上述钢筋初始锈蚀时间服从对数正态分布^[7] ,如腐蚀 80 d , $\bar{\delta} = 20$ mm 时的密度函数为

$$f(x) = \frac{1}{0.640 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - 3.733)^2}{2 \times 0.640^2} \right] \quad (5)$$

不同保护层厚度均值(标准差均为 5 mm)时钢筋初始锈蚀时间的均值如图 2 所示。

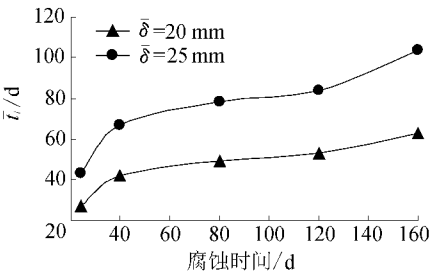


图 2 水工混凝土 $\bar{t}_i$ 与 $\bar{\delta}$ 的关系

上述结果表明 ,在试验条件下 ,增加混凝土保护层的有效厚度是提高混凝土耐久性的重要措施。另外 ,混凝土中钢筋初始锈蚀时间随着混凝土保护层厚度均值的增加差距越来越大。

3 与自然扩散法的比较

根据试验数据 ,利用 Monte-Carlo 法进行模拟 ,人工气候环境下腐蚀 80 d ,可得 $\bar{\delta}$ 分别为 40 mm , 45 mm , 50 mm , 55 mm 和 60 mm 时的 t_{i0} 。不同 $\bar{\delta}$ 时 t_i

的概率密度、概率分布如图 3 和图 4 所示。

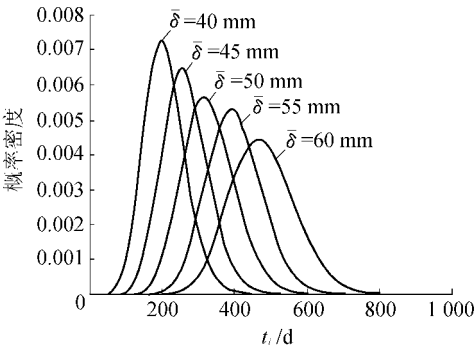


图 3 混凝土(腐蚀 80 d) t_i 的概率密度

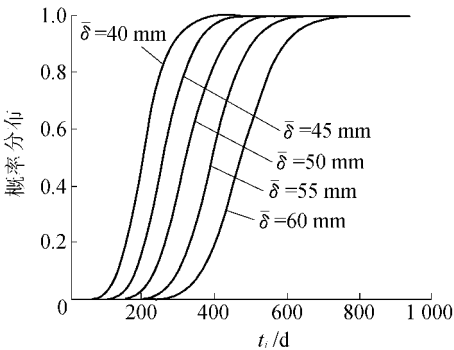


图 4 混凝土(腐蚀 80 d) t_i 的概率分布

模拟得到 $\bar{\delta}$ 为 40 mm , 45 mm , 50 mm , 55 mm , 60 mm 时的 $\bar{t}_i$ 分别为 207.1 d , 264.3 d , 328.6 d , 401.0 d , 478.6 d。

同时进行了自然扩散法试验 ,其混凝土的水灰比与人工气候环境下的差别很小(为 0.60)^[5] ,但 2 种方法得到的 $\bar{t}_i$ 有一定的差异。图 5 是 2 种方法 $\bar{t}_i$ 的对比。

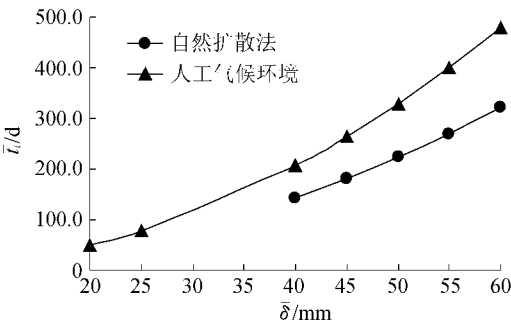


图 5 人工气候环境下腐蚀 80 d 和自然扩散法的水工混凝土 $\bar{t}_i$

由于人工气候环境条件下的混凝土养护时间为 56 d ,腐蚀时间也达到 80 d ,从养护时间上分析 ,其扩散系数应比自然扩散法(养护 28 d ,浸泡于 NaCl 溶液中 35 d)得到的低 ,故其钢筋初始锈蚀时间均值大于自然扩散法的初始锈蚀时间均值。因此 ,在标准养护 28 d 后的自然养护时间对钢筋初始锈蚀时间有一定的影响 ,但不是很大。相对比较(下转第 56 页)

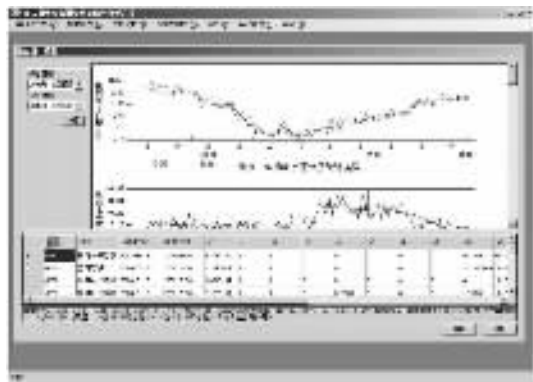


图3 统计模型界面

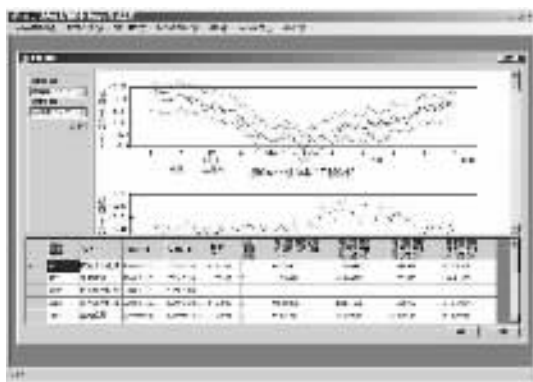


图4 资料分析界面

等特性。系统由测点与仪器管理、数据处理、资料维护、报表、图形、资料分析和系统管理等组成。该系

(上接第 11 页)

分析 2 种试验环境下钢筋初始锈蚀时间的均值模拟计算结论是可信的。

需要说明的是,上述结论是在给定配合比和设定气候环境条件下得到的。由于腐蚀环境因素的不同及测试和计算误差的存在,得到的结论是初步的。人工气候环境下的钢筋初始锈蚀时间与腐蚀因素、荷载条件及养护时间之间的关系还有待于进一步研究。

4 结 论

a. 人工气候环境下的混凝土表面存在明显的对流区,侵蚀试验结果类似于自然环境下的侵蚀。

b. 混凝土保护层的有效厚度对其中钢筋的初始锈蚀时间影响很大,适当增加保护层有效厚度可有效提高混凝土抗氯离子侵蚀的耐久性。

c. 标准养护后的自然养护时间对人工气候环境下钢筋的初始锈蚀时间有一定的影响,但影响不大。人工气候环境下,28 d 标准养护后再自然养护 28 d 的水工混凝土,其钢筋初始锈蚀时间大于自然

统的应用将进一步发挥用 GPS 测量的大坝变形资料对水库安全运行的指导作用,并推进 GPS 技术在大坝变形监测中普及。

参考文献:

- [1] ELLIOTT D K ,CHRISTOPHER J H. GPS 原理与应用[M]. 2 版.寇艳红,译.北京:电子工业出版社,2007:1-10.
- [2] 李立刚.小浪底水利枢纽大坝变形特性及成因分析[J].水利水电科技进展,2009,29(4):39-43.
- [3] 远近,郑东健,李波,等.模糊可拓模型在坝体变形评价中的应用[J].水利水电科技进展,2009,29(1):23-34.
- [4] 保慧,吴永明.基于 .NET Framework 的智能客户端:新一代无接触部署方式[J].计算机应用与软件,2005,22(5):133-135.
- [5] 郭靖. ASP.NET 开发技术大全[M].北京:清华大学出版社,2009:421-430.
- [6] SAHIL M. ADO.NET 2.0 高级程序设计[M].汤涛,邵晓翠,译.北京:人民邮电出版社,2007:93-153.
- [7] 王家耀,孙群,王光霞,等.地图学原理与方法[M].北京:科学出版社,2006:107-114.
- [8] 李佳,付强,丁宁. C# 开发技术大全[M].北京:清华大学出版社,2009:64-167.
- [9] ANDREW P ,NICK R. Visual Studio 2005 高级编程[M].吴雷,译.北京:清华大学出版社,2008:3-76.

(收稿日期:2009-11-23 编辑:高建群)

扩散法的钢筋初始锈蚀时间。

参考文献:

- [1] 郑建军,周欣竹,LI Chun-qing. 钢筋混凝土结构锈蚀损伤的解析解[J].水利学报,2004,35(12):62-68.
- [2] LIANG Ming-te ,LIN Li-hsien ,LIANG Chih-hsin. Service life prediction of existing reinforced concrete bridges exposed to chloride environment[J]. Journal of Infrastructure Systems , ASCE 2002,8(3):76-85.
- [3] 马亚丽,张爱林.混凝土结构钢筋初锈时间的概率模型[J].水利学报,2007,38(5):630-636.
- [4] 吴瑾,吴胜兴.海洋环境下混凝土中钢筋表面氯离子浓度的随机模型[J].河海大学学报:自然科学版,2004,32(1):38-41.
- [5] 周建民.既有混凝土及构件的氯盐侵蚀模拟试验研究[D].杭州:浙江工业大学,2009.
- [6] 吴建华,张亚梅.混凝土抗氯离子渗透性试验方法综述[J].混凝土,2009,23(2):38-41 A6.
- [7] 郑辉.自然环境下混凝土氯离子侵蚀的随机性及寿命预测[D].杭州:浙江工业大学,2009.
- [8] DL/T 5150—2001 水工混凝土试验规程[S].

(收稿日期:2010-01-12 编辑:高建群)