



基于现场取样试验的混凝土结构寿命预测 *

李 庆¹, 赵 健², 蒋琼明¹

(1. 北部湾大学建筑工程学院, 广西 钦州 535011; 2. 中交天航南方交通建设有限公司, 广东 深圳 518101)

摘要: 在役码头钢筋混凝土结构耐久性寿命预测面临可供分析参数少、契合度不高、预测结果存疑等问题, 通过现场取样试验, 获取混凝土芯样氯离子浓度分布值, 基于修正的氯离子扩散模型, 利用 Matlab 软件进行回归分析, 得到试件的氯离子扩散系数、衰减系数和表面氯离子浓度等参数, 并对在役码头胸墙钢筋混凝土结构耐久性寿命进行预测。结果表明: 参数定值法预测结果过大, 而基于失效概率预测方法的预测结果与规范方法计算结果基本一致, 更符合工程实际。

关键词: 取样试验; 氯离子检测; 混凝土耐久性; 寿命预测

中图分类号: U654; TU528

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0030-05

Life prediction for concrete structure based on site sampling test

LI Qing¹, ZHAO Jian², JIANG Qiongming¹

(1. College of Engineering and Architecture, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China;

2. CCCC TDC Southern Communication Co., Ltd., Shenzhen 518101, China)

Abstract: The durability life prediction of the reinforced concrete structure of the existing wharf is faced with the problems of few available analysis parameters, low degree of fit, and doubtful prediction results. We obtain the distribution value of chloride ion concentration in the concrete core sample through on-site sampling tests. Based on the modified chloride ion diffusion model, we carry out the regression analysis using Matlab software to obtain the chloride ion diffusion coefficient, attenuation coefficient, surface chloride ion concentration and other parameters of the test piece, and predict the durability life of the breast wall reinforced concrete structure of the existing wharf. The results show that the prediction results of the parameter setting method are too large, and the prediction results based on the failure probability prediction method are basically consistent with the calculation results of the standard method, which is more consistent with the engineering practice.

Keywords: sampling test; chloride ion detection; concrete durability; life prediction

海港码头钢筋混凝土结构长期处于海洋环境中, 氯盐侵蚀诱发混凝土内部钢筋腐蚀已成为影响码头水工建筑物耐久性的首要因素。现有研究中更多的是关注于氯离子扩散模型的修订^[1]、混凝土抗氯离子渗透^[2], 且多以室内或试块暴露为主, 缺乏对现役码头结构耐久性剩余寿命的研究与分析。室内快速试验或试块暴露试验研究所得

参数可否直接用于在役码头的耐久性寿命预测也有待研究。本文通过对在役码头胸墙结构进行取样试验, 以 Fick 第二定律为基础, 计算拟合混凝土氯离子表观扩散系数、表面氯离子浓度等参数, 运用氯离子扩散随机模型预测在役码头钢筋混凝土胸墙结构耐久性寿命, 以期提高预测结果的可信度, 为在役钢筋混凝土结构维护及修复提供参考。

收稿日期: 2023-06-19

*基金项目: 广西教育厅高校科研项目 (2022KY0414); 北部湾大学高层次人才科研启动项目 (2019KYQD43)

作者简介: 李庆 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道工程施工技术研究。

1 取样试验研究

1.1 试验过程

现场以高程为采样基准,避开明显裂缝和锈斑处,采用套筒钻取直径约为50 mm、深度70~100 mm的芯样,封装后带回实验室标记烘干。采

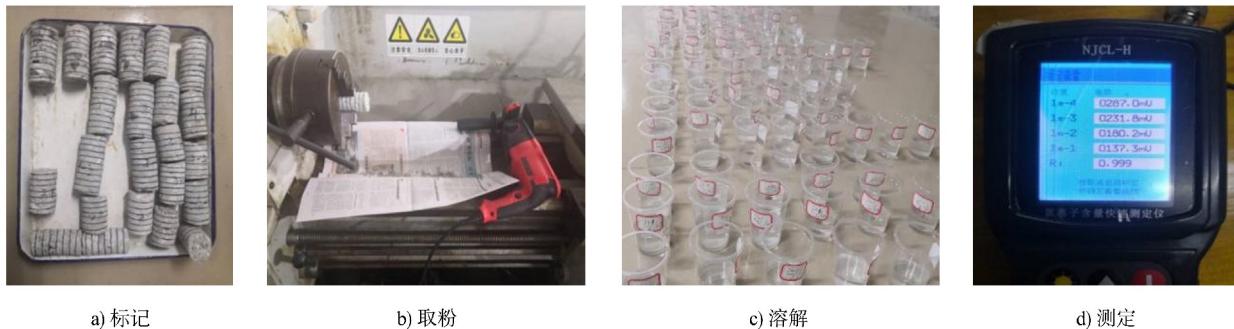


图1 氯离子含量测定过程

1.2 试验结果

浪溅区为钢筋混凝土结构最危险区域,以钦州港5 000 t杂货码头为研究对象,在胸墙高程为4.5 m处取得4件芯样,氯离子浓度分布试验结果见表1,平均氯离子浓度分布随深度变化情况如

用机床夹具固定,冲击钻钻取粉末,研磨过筛,称质量及溶解。采用型号为NJCL-H的氯离子含量快速测定仪(RCT)测定芯样距表面不同深度的水溶性氯离子含量,如图1所示。

图2所示。试验结果表明,芯样氯离子浓度随着与结构表面距离的增加而减小。当与结构表面距离大于20 mm时,氯离子浓度呈急剧下降的趋势,表明其分布受距离影响十分明显,距离超过50 mm时,曲线则较为平缓。

表1 氯离子浓度分布

编号	氯离子浓度(混凝土质量)/%					
	深度0~<10 mm	深度10~<20 mm	深度20~<30 mm	深度30~<40 mm	深度40~<50 mm	深度50~<60 mm
1	0.278	0.214	0.167	0.095	0.060	0.050
2	0.482	0.274	0.161	0.112	0.076	0.038
3	0.295	0.154	0.114	0.065	0.052	0.023
4	0.614	0.415	0.223	0.157	0.039	0.027
平均	0.417	0.264	0.166	0.107	0.056	0.035

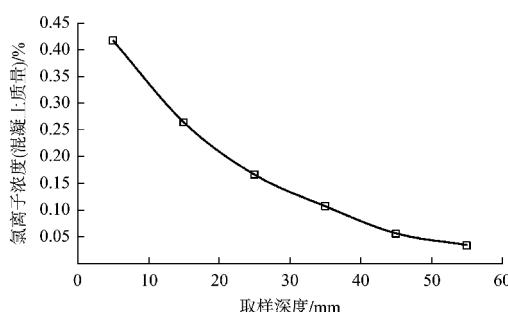


图2 氯离子平均浓度分布曲线

2 预测模型及参数计算

2.1 预测模型

海洋环境中,钢筋混凝土结构的寿命预测,多数以氯离子在混凝土中的迁移扩散为基础,临

水面混凝土表面与内部存在氯离子浓度梯度,使得氯离子由混凝土表面不断扩散进入混凝土内。假定氯离子扩散系数不变,在半无限均质体中,该扩散过程应满足Fick第二定律:

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

式中: C 为氯离子浓度,%; t 为扩散时间,a; x 为距混凝土表面的深度,mm; D 为混凝土中氯离子扩散系数,mm/a。引入 $C_x(t=0)=C_0$; $C_x(x=0)=C_s$ 边界条件, Collpeardi 等^[3]给出了 t 时刻, 距混凝土表面深度为 x 时的氯离子浓度为:

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

式中: C_0 为混凝土初始氯离子浓度, %; C_s 为混凝土表面氯离子浓度, %; D_t 为 t 时刻混凝土氯离子扩散系数, mm/a; erf 为误差函数。

扩散系数为非常量值, 受氯离子浓度、湿度、温度及胶凝材料等影响, 具有明显的时间依赖性, Thomas 等^[4]根据试验得出混凝土氯离子扩散系数随时间的变化规律:

$$D_t = D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \quad (3)$$

式中: D_0 为 t_0 时刻的氯离子扩散系数, mm/a, 一般取 28 d 氯离子扩散系数; m 为衰减系数。

将式(3)代入式(2)得:

$$C_{s,t} = C_0 + (C_s - C_0) \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{D_0 t_0^m t^{1-m}}} \right) \quad (4)$$

在求出模型相关参数和确定临界氯离子浓度值后, 即可用式(4)对钢筋混凝土结构耐久性寿命进行预测。

2.2 参数计算

于湿交替环境条件下, 在混凝土内部一定深度处存在对流区, 对氯离子的扩散产生影响^[5], 按式(2)对各芯样不同深度的氯离子浓度值进行拟合时, 需要考虑对流区对拟合曲线的影响。本文舍去深度 0~10 mm 数据后再拟合, 得到某一时刻氯离子浓度随深度变化的曲线, 如图 3 所示, 计算可得对应时间的表观氯离子扩散系数 D_t 和混凝土表面氯离子浓度 C_s 。根据得到各时刻的 D_t 值, 按式(3)软件进行拟合, 如图 4 所示, 求出 D_0 和衰减系数 m 。

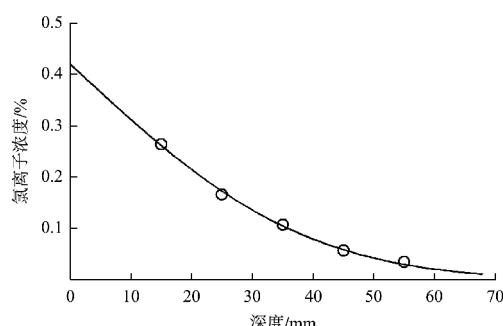


图 3 氯离子浓度拟合曲线

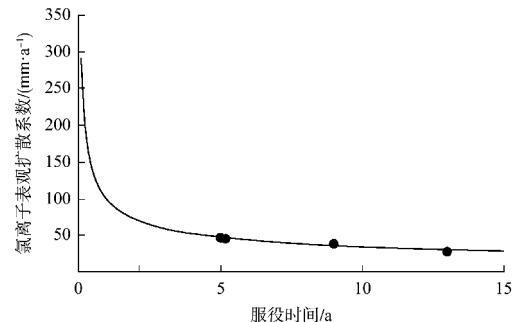


图 4 氯离子表观扩散系数随时间变化拟合曲线

研究表明^[6], 随着混凝土龄期的增加, 水泥水化程度逐渐提高, 混凝土趋于密实, 使得混凝土表面氯离子浓度呈初期增长较快而后期增长趋缓, 达到一定时间后, 趋于稳定, 提出其指数时变模型:

$$C_{s,t} = C_{s0} (1 - e^{-nt}) \quad (5)$$

式中: $C_{s,t}$ 为 t 时刻表面氯离子浓度, %; C_{s0} 为稳定后的表面氯离子浓度, %。

按式(5), 利用 Matlab 数学软件对不同时刻的表面氯离子浓度值与时间进行拟合, 如图 5 所示, 求出混凝土表面稳定时的表面氯离子浓度 C_{s0} 。

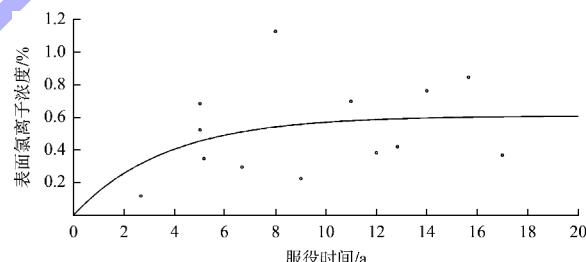


图 5 混凝土表面稳定氯离子浓度拟合曲线

3 工程应用

3.1 扩散预测模型

钦州港 5 000 t 杂货码头胸墙结构混凝土强度等级为 C40, 保护层厚度为 65 mm, 取样时服役时间为 12.83 a。因单次取样测试无法满足相关参数的拟合计算, 在保证结构所属环境基本相同前提上, 同时尽量减少不同水灰比对分析结果的影响, 本文结合钦州港地区码头胸墙结构混凝土强度等级同为 C40 的钦州港 5 万 t 码头(服役时间为 5.17 a)^[7], 钦州港吉码头(5 a)、钦州港勒沟 2#码头(9 a)浪

溅区的平均氯离子浓度分布实测数据^[8]对钢筋混凝土胸墙结构进行耐久性寿命预测。各典型码头服役时间及浪溅区氯离子浓度分布见表2,氯离子

浓度随深度变化如图6所示。可以看出,氯离子浓度分布大体上呈现出随深度增加而递减、随服役年限增加而增大的特征。

表2 典型码头浪溅区平均氯离子浓度分布

码头名称	氯离子浓度(混凝土质量)/%						服役时间/a
	深度5 mm	深度15 mm	深度25 mm	深度35 mm	深度45 mm	深度55 mm	
吉码头	0.425	0.311	0.113	0.073	0.048	0.044	5.00
钦州港5万t码头	0.371	0.222	0.145	0.083	0.052	0.028	5.17
勒沟2#码头	0.331	0.140	0.056	0.035	0.035	0.032	9.00
杂货码头	0.417	0.264	0.166	0.107	0.056	0.035	12.83

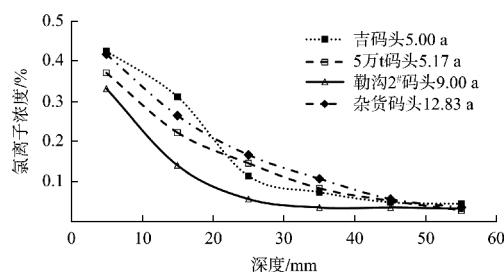


图6 氯离子浓度随深度变化曲线

通过拟合计算得到4座码头的表观氯离子扩散系数 D_t 和表面氯离子浓度 C_s ,见表3。将表3数值代入式(3),求得28 d氯离子表观扩散系数 $D_0=329.7$ 、衰减系数 $m=0.47$ 。

表3 氯离子表观扩散系数和混凝土表面浓度

码头名称	服役时间/a	$D_t/(mm \cdot a^{-1})$	$C_s/\%$
吉码头	5.00	47.22	0.605
5万t码头	5.17	45.68	0.348
勒沟2#码头	9.00	39.15	0.225
杂货码头	12.83	28.08	0.473

依据广西沿海地区11座码头及本次试验检测的2座码头浪溅区混凝土氯离子浓度分布的实测数据进行分析,拟合计算出各码头对应服役时间的表面氯离子浓度 C_s ,见表4,再用式(5)拟合计算出该地区稳定后的表面氯离子浓度为 $C_{s0}=0.61$ 。文献[7]对已有304组自然暴露混凝土试块试验数据进行分析,发现混凝土表面氯离子浓度与水灰比之间呈线性增大关系,本文所选取的13座码头胸墙结构混凝土强度等级均不大于C40,用 $C_{s0}=0.61$ 预测杂货码头胸墙结构钢筋混凝土耐久性寿命是偏安全的。

表4 广西沿海地区典型码头胸墙结构混凝土表面氯离子浓度

港口	码头	混凝土强度等级	服役时间/a	$C_s/\%$
铁山港	1#码头	C40	2.67	0.118
防城港	13#码头	C40	6.67	0.295
	杂货码头	C40	12.83	0.420
	出石码头	C20	15.65	0.849
	和码头	C30	5.00	0.524
	吉杂码头	C40	5.00	0.685
	恒码头	C30	8.00	1.130
钦州港	丰码头	C30	11.00	0.701
	勒沟2#码头	C40	9.00	0.224
	3#中码头	C25	12.00	0.384
	勒沟1#码头	C20	14.00	0.764
	中码头	C20	17.00	0.369
	5万t码头	C40	5.17	0.348

氯离子侵入保护层扩散至钢筋并累积到一定浓度时才会引起钢筋锈蚀,该浓度即为临界氯离子浓度 C_c 。临界氯离子浓度值受混凝土质量、温度、湿度及所处部位等因素影响。水胶比在0.35~0.40时引起混凝土中钢筋腐蚀的氯离子含量的临界值,JTS 304—2019《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》^[9]推荐为0.4(占胶凝材料质量总量的百分比),根据该码头C40混凝土配合比得知,胶凝材料含量为461 kg/m³,混凝土密度为2 400 kg/m³,换算得临界值为0.08(占混凝土质量总量的百分比),当钢筋表面($x=d$ 处)氯离子浓度达到该值时,认为钢筋开始锈蚀破坏。

综上所述,本文预测该5 000 t杂货码头胸墙结构混凝土耐久性寿命参数取值为: $m=0.47$ 、 $D_0=329.7 \text{ mm/a}$ 、 $C_0=0\%$ 、 $t_0=28 \text{ d}$ 、 $C_{s0}=0.61\%$ 、 $C_c=0.08$ 。

3.2 定值法预测

将保护层厚度 $x = 65 \text{ mm}$ 及计算所得参数代入式(4)，若求得的 $C_{x,t}$ 等于 C_c 则对应的时间即为结构的耐久性总寿命，减去服役时间可得剩余寿命时间。若将混凝土耐久性寿命参数、混凝土保护层厚度及临界氯离子浓度等视为定值时，计算求得该杂货码头的耐久性寿命约为 70 a，意味着杂货码头混凝土耐久性剩余寿命约为 53 a。

现行的 JTS 304—2019《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》对现役码头耐久性寿命评估时规定，如果检测结构物使用年限已达 10 a 及以上时，混凝土有效扩散系数应当按实测值选取。该杂货码头取样时已服役时间为 12.83 a，拟合计算得出该码头的有效扩散系数为 28.08 mm/a，代入式(2)得该码头胸墙钢筋混凝土结构耐久性寿命约为 35.0 a，其剩余寿命约为 22.2 a。

3.3 基于失效概率法预测

在生产建设过程中，由于受混凝土原材料、搅拌、运输、浇筑、养护及操作人员变化等的影响，对混凝土质量及保护层厚度造成一定的离散性。文献[10-12]统计分析表明，钢筋混凝土结构氯离子表观扩散系数、保护层厚度等是具有统计分布的变量，服从正态分布，同时也给出了各参数变异系数的取值范围。结合现场实际，该杂货码头浪溅区表观扩散系数、保护层厚度、衰变系数和表面氯离子浓度变异系数取值分别为 0.10、0.10、0.06 和 0.14。采用 Monte Carlo 法计算基于结构耐久性失效的概率，抽样数量取 5 000，计算结果如图 7 所示。可以看出，失效概率在服役初期变化较为平缓，服役后期变化十分迅速，这与工程实际相符。结构耐久性属正常使用极限状态范畴，目标可靠度通常取 1~2。当可靠度取 1.0 时，该杂货码头钢筋混凝土胸墙结构耐久性寿命约为 35.3 a，剩余寿命约为 22.5 a，结果与规范方法计算基本一致，小于按公式(4)预测的结果。

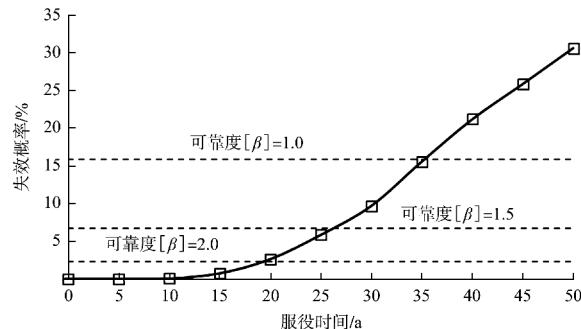


图 7 失效概率时变曲线

需要指出的是基于 Fick 第二定律预测的时间是钢筋表面开始去钝化的时间，而钢筋开始锈蚀至保护层开裂尚需一定时间。一般对于浪溅区的普通钢筋混凝土结构，从钢筋开始锈蚀到保护层开裂的时间为 5~7 a。以上分析表明，该码头耐久性总寿命约为 40 a，剩余寿命约为 27 a，胸墙钢筋混凝土结构在后期的运营过程中须加强维护，以延长其服役期限。

4 结论

1) 通过现场取样试验，实测得到在役海港码头胸墙钢筋混凝土结构芯样试件中的氯离子浓度分布，基于氯离子扩散模型，利用 Matlab 数学软件，回归得到表观氯离子扩散系数、衰减系数和表面氯离子浓度的方法更贴近工程实际。

2) 定值法忽略了拟合参数的随机特性，耐久性寿命预测结果偏高。

3) 考虑表观扩散系数、保护层厚度、表面氯离子浓度和衰减系数的随机特性，采用 Monte Carlo 法，基于耐久性失效概率预测结构服役寿命与规范方法计算结构较为吻合，也比较符合工程实际，有较好的适用性。

参考文献：

- [1] 乔宏霞, 乔国斌, 路承功. 混凝土中氯离子传输模拟及速率分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 19-25.
- [2] 王胜年, 曾俊杰, 范志宏. 基于长期暴露试验的海工高性能混凝土耐久性分析[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 82-89.

(下转第 59 页)