

基于氯离子扩散模型的高桩码头结构耐久性评估

张攀

(中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 环境中化学物质对建筑材料的侵蚀作用对建筑物的建造及维护成本有较大的影响, 以氯离子为代表的腐蚀环境是造成钢筋混凝土结构失效的主要原因之一。当混凝土内部氯离子积聚量超过临界浓度时, 对钢筋的侵蚀作用进入结构的失效期, 混凝土保护层逐步失去作用。基于此, 本文参考 Fick 第二扩散定律, 建立了修正的氯离子扩散模型。以某高桩码头混凝土结构寿命预测为例, 通过传统模型与修正模型的计算结果对比, 验证了修正模型的合理性。

关键词: 氯离子扩散模型; 高桩码头; 混凝土结构; 耐久性评估

中图分类号: U656.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2025) 05—0034—04

混凝土结构因其良好的性能而被广泛应用于建筑工程行业, 能够在多种环境下保持较高的强度和刚度, 承受较大的荷载, 抵抗结构的变形, 尤其是在正常维护条件下, 混凝土结构能够适应不同的气候和地理环境, 其耐久性远超其他建筑材料^[1]。同时, 混凝土的原材料普遍且价格低廉, 施工技术成熟, 可塑性较强, 在正常使用和维护情况下, 混凝土结构的维护成本相对较低, 因此混凝土结构成为当前建筑、市政、水利工程中不可获缺的建筑材料。据不完全统计, 2023 年我国商品混凝土的使用量达到 26.9 亿立方米, 稳居世界第一, 虽与 2022 年相比有所下降, 但在建筑材料中占比仍处于高位。然而混凝土结构也存在一定的局限性, 如自重过大、脆性、恶劣环境下的抗腐蚀性以及特殊荷载下的耐久性等^[2-3]。

恶劣类环境下的混凝土结构耐久性研究是一个复杂且重要的课题, 主要包括了混凝土结构在严酷环境条件下的性能退化、损伤演变以及结构性能退化机理。因此研究腐蚀环境下, 特别是氯离子浓度较高环境下的混凝土使用寿命评估对混凝土结构的保护与维修具有重要意义。

1 氯离子侵蚀机理及耐久性分析

1.1 氯离子的侵蚀机理

氯离子广泛存在于自然环境中, 如海水、土壤、空气中, 特别是在工业生产过程中, 不规范的污染物排放加速了自然环境中氯离子的扩散与沉积^[4]。本文从以下三个方面具体分析氯离子在混凝土结构中的渗透、扩散及侵蚀机理。

1.1.1 破坏钢筋钝化膜

混凝土材料的硬化过程与水泥水化相互同步, 水泥水化后生成大量大量的碱性物质, 而从使得混凝土长期处于碱性状态下。 OH^- 与钢筋中的铁元素生成的水氧化物 ($n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$) 属于较为稳定的沉积物, 逐步附着于钢筋表面, 形成一定厚度的钝化膜, 使得混凝土结构中的钢筋在潮湿、富氧等环境下也难以锈蚀, 从而提高了混凝土结构的耐久性。当混凝土骨料或环境中氯离子浓度提高时, Cl^- 逐步分解 $n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$, 在钝化膜内生产易溶解的 FeCl_2 , 因此钢筋在失去钝化膜的情况下, 生铁外露, 并氧化而出现铁锈, 铁锈的体积较大, 会在混凝土内部逐步扩大, 促使混凝土结构逐步胀损, 强度及耐久性下降, 影响结构安全。

1.1.2 形成腐蚀电池效应

氯离子对混凝土耐久性的影响从破坏钝化膜开始, 但由于混凝土内部的腐蚀电池的作用, 钢筋强度受到的破坏更为显著。氯离子富集区, 钝化膜破坏较快, 铁离子析出, 形成阳极, 两个负离子从阳极向阴极转移, 而且阳极面积比阴极小, 电子的转移过程在混凝土结构中形成电位差, 使得铁锈 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 以点状的形式在钢筋的表面富集, 最开始是形成的点状锈斑, 随着时间的推移, 点状锈斑逐步变为片状, 并逐步全部锈蚀, 降低了钢筋与混凝土间的黏结强度, 影响结构安全。

1.1.3 去极化作用

当混凝土结构内部形成腐蚀电池效应后, Fe^{2+} 逐步在阳极积累, 与阳极附近的 Cl^- 反应生成易溶的 $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 加速了钢筋的锈蚀过程。 $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 稳定性极差, 会迅速分解成为不易溶的 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 H_2O 、

H^+ 及 Cl^- ，生成铁锈 $Fe(OH)_3$ ，属于阳极去极化作用。该过程中 Cl^- 并未生成有效的难溶沉淀物，而是又重新以 Cl^- 的状态参与钢筋表面钝化膜的破坏过程，起到了类似“催化”的作用，无法在腐蚀电池效应过程中被消耗，加速了混凝土中钢筋的锈蚀过程。氯离子侵蚀机理如图 1 所示。

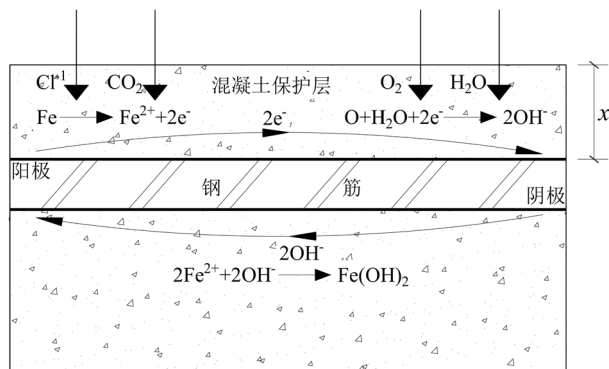


图 1 氯离子的渗透、扩散及侵蚀

1.2 混凝土结构耐久性分析

混凝土结构在长期使用过程中，混凝土结构不可避免的会受到酸、碱、盐、抗冻和化学的侵蚀，使得混凝土结构无法承受原有的建筑荷载，无法达到原有的设计使用年限。混凝土保护层作为钢筋混凝土结构抵抗外部环境损害的主要措施，在抗酸、碱、盐、抗冻和化学的侵蚀的过程中发挥着重要作用，一旦混凝土保护层破坏，钢筋暴露在空气中后会迅速氧化生锈，对混凝土结构造成不可逆转的影响。

混凝土结构在受到氯离子渗透、扩散及侵蚀作用后，将难以维持其设计性能和使用功能，特别是当混凝土表面裂缝较多时，氯离子会沿着裂缝逐步渗透至混凝土内部，而对于新浇筑的混凝土，环境中的氯离子也会分阶段渗透至混凝土内部^[5]。将这种渗透过程分为三个阶段，如图 2 所示。

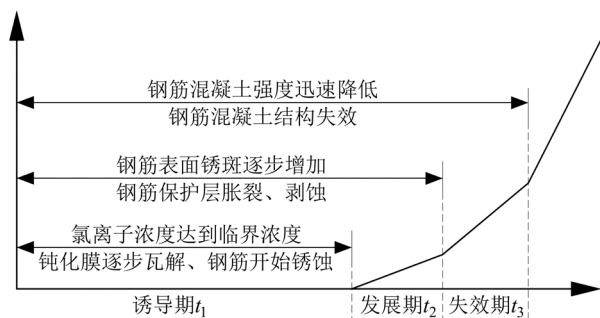


图 2 氯离子在混凝土结构中的渗透过程

诱导期内氯离子开始渗透进入混凝土结构，并逐渐向钢筋靠近，但由于混凝土的孔结构和材料特性，氯离

子在混凝土中的渗透过程受到一定的阻碍。在诱导期内，混凝土结构中的氯离子逐步趋近临界浓度，钢筋表面的钝化层开始受到氯离子的侵蚀，但尚未发生显著的钢筋锈蚀。发展期内，随着氯离子浓度在钢筋附近的积累，钢筋开始锈蚀，锈蚀产物体积膨胀，导致混凝土产生裂缝，进一步加速氯离子的渗透，该阶段氯离子对混凝土结构的劣化作用逐步显著，结构耐久性及安全性受到威胁。在失效期，由于钢筋的持续锈蚀和混凝土结构的进一步劣化，混凝土结构的承载能力显著降低，并最终导致混凝土结构的破坏及失效。

2 混凝土耐久性预测模型

2.1 混凝土结构寿命预测

使用环境及混凝土材料中氯离子的浓度对混凝土耐久性有着直接影响，当混凝土中氯离子逐步聚集后，浓度逐步增加，在腐蚀电池效应的作用下钢筋锈蚀。目前，规范中使用 Fick 第二定律，根据可靠程度的概率模型对混凝土中氯离子的扩散过程进行描述和寿命预测^[6]。Fick 第二定律有以下基本假设：①混凝土材料是均质同性材料；②混凝土结构中氯化物的扩散呈单向，即从混凝土表面逐步渗透迁移到钢筋表面；③氯离子在混凝土结构中扩散时，其浓度不随时间的变化而变化。

Fick 第二扩散定律基本形式如式（1）所示：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (1)$$

Fick 第二定律表明在混凝土材料某个位置上物质浓度随时间的变化率与该位置的浓度梯度的曲率成正比，其解析解如式（2）所示：

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

式中， $C(x,t)$ 表示在 t 时刻，距离混凝土保护层表面 x 位置的氯离子浓度，%； C_s 表示 t 时刻环境中的初始氯离子浓度，%； C_0 是 t 时刻混凝土骨料中氯离子的初始浓度，%，与骨料性质有关； erf 为误差函数，按式（3）计算，查表得到：

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-u^2} du \quad (3)$$

根据式（2），当 x 取混凝土保护层厚度，氯离子逐步从混凝土表面向钢筋表面渗透， $C(x,t)$ 取混凝土结构的氯离子临界浓度，在扩散系数 D 条件下计算得到的时间 t 即为氯离子达到钢筋表面的时间，当氯离子侵蚀至钢筋表面时，氯离子对混凝土的侵蚀由诱导期进入

发展期, 结构开始失效, 即混凝土结构寿命达到。假设拌制时混凝土中的氯离子含量为 0, 即 $C_0=0$, 氯离子均来自于混凝土的使用环境中, 则式 (2) 可以简写为:

$$C(x,t)=C_s\left[1-\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D\cdot t}}\right)\right] \quad (4)$$

根据式 (4), 混凝土骨料中氯离子浓度为 0 的情况下, 混凝土结构的使用寿命 t 随着环境中氯离子浓度、氯离子扩展系数的增加而减小, 随混凝土保护层厚度的增加而增加。

2.2 基于 Fick 第二扩散方程的修正模型

根据 Fick 第二扩散定律的基本假设, 渗透过程中氯离子的浓度是不变的, 但是密实度越高的混凝土, 氯离子的渗透速度就越小, 而密实度更高的混凝土, 其内部的孔隙连通率也更低, 这些因素都对氯离子的渗透过程产生了更大的阻碍作用, 从而使氯离子的渗透速度减缓。同时, 氯离子的渗透过程并非单向的, 当进入混凝土内部后, 会朝着各个方向渗透, 而只有向钢筋面渗透的氯离子才会影响混凝土的结构强度。通过以上分析可以发现, 氯离子浓度会在向混凝土内部渗透过程中逐渐降低, 即扩散系数减小。将氯离子的渗透速度采用时间衰减函数表示, 即随着氯离子渗透时间的增加, 其浓度是逐步减小的, 如式 (5) 所示。

$$\frac{D_t}{D_0}=\left(\frac{t_0}{t}\right)^m \quad (5)$$

式中: D_0 为基准期 t_0 时混凝土中氯离子的扩散系数, cm^2/a ; t_0 为混凝土的 28d 基准期, 约 0.0767a; m 为常数, 经试算取 0.01。

将式 (5) 代入 Fick 第二扩散定律中。

$$C(x,t)=C_0+(C_s-C_0)\left[1-\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_0\cdot t_0^m\cdot t^{1-m}}}\right)\right] \quad (6)$$

$$C(x,t)=C_s\left[1-\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_0t_0^m\cdot t^{1-m}}}\right)\right] \quad (7)$$

在进行混凝土结构寿命预测时, 环境中的氯离子浓度及混凝土结构的保护层厚度可通过测量得到, 此时当 t_0 时刻的氯离子扩散系数 D_0 确定后, 通过反算可以计算出环境中氯离子通过保护层渗透至钢筋面的时间 t , 即混凝土结构的使用寿命, 如式 (8) 和 (9) 所示。

$$t=\left\{\frac{h^2}{4D_0t_0^m\operatorname{erfc}^2\left[1-\frac{C(x,t)-C_0}{C_s-C_0}\right]}\right\}^{\frac{1}{1-m}} \quad (8)$$

$$t=\left\{\frac{h^2}{4D_0t_0^m\operatorname{erfc}^2\left[1-\frac{C(x,t)}{C_s}\right]}\right\}^{\frac{1}{1-m}} \quad (9)$$

式中: h 为混凝土保护层厚度设计值, cm ; D_0 为氯离子初始扩散系数, 取 $4.5\text{cm}^2/\text{a}$; t_0 为混凝土基准期, 可按标准养护龄期 28d 确定, 取 0.0767a; m 为常数, 取 0.01; C_s 为环境中的氯离子浓度, %, 可通过现场测量得到; $C(x,t)$ 为混凝土材料的临界氯离子浓度, 取 0.05%; erfc 为反误差函数。

3 高桩桥墩混凝土结构寿命预测

某临海高桩码头工程位于江苏沿海区域, 长期处于富氯离子环境中, 持续恶化混凝土结构的耐久性和安全性。由于该码头处于临海区域, 氯离子浓度取 3.0%, C_0 取 0.0125%, 混凝土构件的设计混凝土保护层厚度为 5cm。采用式 (2)、(4)、(8)、(9) 四种方法对高桩码头混凝土结构混凝土寿命进行预测, 如表 1 所示。

表 1 高桩桥墩混凝土结构混凝土寿命预测

参数		Fick 第二扩散方程	简化 Fick 第二扩散方程	修正的 Fick 第二扩散方程	修正的简化 Fick 第二扩散方程
混凝土氯离子浓度	$C_d/\%$	0.0125	0	0.0125	0
环境中氯离子浓度	$C_f/\%$	3.0	3.0	3.0	3.0
临界氯离子浓度	$C(x,t)/\%$	0.05	0.05	0.05	0.05
氯离子扩散系数	$D_0/(\text{cm}^2/\text{a})$	4.5	4.5	4.5	4.5
28d 混凝土龄期	t_0/a	—	—	0.0767	0.0767
常数	m	—	—	0.010	0.010
钢筋保护层厚度	h/cm	5.0	5.0	5.0	5.0
误差函数	$\operatorname{erfc}(z)$	0.1625	0.1643	0.1625	0.1643
预测寿命	t/a	52.848	53.430	56.131	57.524

根据表 1 计算成果可知, 四种预测方法计算得到的混凝土结构使用寿命均大度 50 年, 满足一般建筑设计使用年限 50 年的要求。传统的 FICK 第二扩散方程不考虑渗透过程中氯离子的衰减问题, 所得到的预测结果偏保守, 简化 Fick 第二扩散方程未考虑混凝土骨料中已含的氯离子, 因此混凝土的预测寿命值偏大。而修正的 Fick 第二扩散方程考虑了氯离子在混凝土中渗透过程的不规则性, 采用了基于时间的衰减函数, 在寿命预测过程中, 向钢筋表面渗透的氯离子浓度是逐步减小的, 更加符合实际。

基于 PDCA 理论的三峡船闸检修动机作业安全风险防控方法与实践

黄小亮, 郑经一, 陈友之, 张宏雷, 韩新

(长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 自 2003 年三峡船闸通航以来, 长江航运事业迎来高速发展, 三峡船闸船舶过闸需求急剧增加, 三峡船闸设备设施长期处于满负荷运行状态。依据三峡船闸检修规程, 通过计划性停航检修工作, 进行设备预检预修、缺陷处理和技术升级改造, 保障三峡船闸安全高效运行。三峡船闸创新了计划性停航检修与预检预修相结合的检修组织模式, 并自 2012 年开始周期性的单线船闸计划性停航检修工作。为有效配合各施工单位完成停航检修工作, 三峡船闸处成立检修动机组专门进行检修动机配合。本文旨在对三峡船闸停航检修动机配合风险进行分析探讨并借鉴管理学中的 PDCA 循环理论, 提出相应的管控措施。

关键词: 三峡船闸; 检修动机; 安全; 防控

中图分类号: U641.8

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2025) 05—0037—03

三峡船闸由水工建筑物、金属结构、工作门启闭机及电液控制系统、桥机、变电所、给排水设备、通信系统、消防系统、照明系统等组成。计划性停航检修涉及金属结构、水工、防腐、电气、液压等多个施工项目, 为尽可能减少船闸停航检修对船舶通航的影响, 计划性停航检修往往是多单位多部门联合施工。自 2012 年三峡船闸开展计划性停航检修工作以来, 为配合各参修单

位完成设备动机配合, 保障设备动机安全, 三峡船闸管理处成立检修动机配合小组, 专人专职负责检修施工动机配合。

检修施工动机小组主要工作内容包括: 负责配合检修施工的设备动机; 负责检修排水泵房抽水及闸室抽排水; 负责船闸施工检修电源箱施工接电、用电安全巡查, 用电故障排除及恢复等。检修动机配合是整个计划性停

4 结论

传统的扩散模型未考虑氯离子在混凝土内部渗透、侵蚀时的衰减问题, 导致混凝土结构寿命预测结果偏保守, 本文在 Fick 第二扩散定律的基础上, 以氯离子扩散模型为依据, 考虑扩散系数随扩散时间的衰减规律而建立了混凝土结构使用寿命预测模型, 并从渗透过程、化学反应等方面分析了氯离子的渗透、侵蚀过程。以沿海区域某高桩码头混凝土结构为例, 对四种预测模型的计算结果进行了分析。结果表明, 传统的计算模型预测结果偏保守, 而本文提出的预测模型与实际相符, 更为合理。

参考文献:

[1] 林轩达. 港口高桩码头结构性能退化研究 [J]. 珠江水运, 2024, (23): 72-74.

[2] 王得泰. 海港高桩码头钢筋混凝土结构耐久性评估及修复技术研究 [J]. 交通世界, 2024, (30): 15-17.

[3] 周洋. 内河高桩梁板式码头结构耐久性分析及工程应用 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.

[4] 杨承磊. 基于保护层厚度检测结果的混凝土耐久性分析 [J]. 科学技术创新, 2024, (18): 121-124.

[5] 杨意, 白亚琼, 李琪, 等. 关于既有混凝土结构耐久性评定方法的研究 [J]. 工程质量, 2024, 42(07): 26-30.

[6] 叶君, 李显强, 赵忻凯, 等. 基于 AHP 的弱腐蚀地下水区域的桩基耐久性分析 [J]. 四川建材, 2024, 50(08): 93-94+124.