

文章编号:1673-2049(2017)04-0057-08

# 考虑表面氯离子质量分数的沿海混凝土桥梁 氯离子扩散修正模型

何化南<sup>1</sup>,冯 叶<sup>1</sup>,张冠华<sup>2</sup>,王佳伟<sup>2,3</sup>

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁 大连 116024; 2. 辽宁省交通规划设计院有限责任公司,辽宁 沈阳 110166; 3. 辽宁大通公路工程有限公司,辽宁 沈阳 110005)

**摘要:**为了研究沿海距海岸距离为5~40 km钢筋混凝土桥梁的氯离子扩散规律,建立与之相适应的氯离子扩散模型,对沈山(沈阳—山海关)高速公路沿线25座钢筋混凝土桥梁进行钻芯取样,研究了表面氯离子质量分数和水胶比的关系。引入表面氯离子质量分数实测值与拟合值的比例系数,建立表面氯离子质量分数和距海岸距离的数学关系,结合氯离子表观扩散系数的时间效应对Fick第二定律的解析解进行修正。通过对比实测值和修正模型的拟合值验证模型的适用性。结果表明:构件表面氯离子质量分数与水胶比成正比,比例系数服从正态分布的统计规律;构件表面氯离子质量分数随着距海岸距离的增加而逐渐减小,二者呈指数关系;由修正后的氯离子扩散模型计算得出的拟合值能够包络大多数实测值,拟合结果偏安全。

**关键词:**混凝土结构;氯离子扩散模型;Fick第二定律;表面氯离子质量分数;水胶比

**中图分类号:**TU375 **文献标志码:**A

## Revised Chloride Ion Diffusion Models of Concrete Bridges Near Coastal Areas Considering Surface Chloride Ion Concentration

HE Hua-nan<sup>1</sup>, FENG Ye<sup>1</sup>, ZHANG Guan-hua<sup>2</sup>, WANG Jia-wei<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 2. Liaoning Provincial Communication Planning & Design Institute Co., Ltd., Shenyang 110166, Liaoning, China; 3. Liaoning Datong Road Construction Co., Ltd., Shenyang 110005, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to research the chloride ion diffusion law of reinforced concrete bridges whose distance from the coast was 5-40 km, a proper chloride ion diffusion model was built, and 25 bridges along Shenyang-Shanhaiguan highway were sampled by the method of drilling core. The relationship between surface chloride ion concentration and water-binder ratio was analyzed. The proportionality coefficient of the measured values and the fitted values of surface chloride ion concentration was brought in to establish the mathematical relationship between surface chloride ion concentration and distance from the coast. The analytic solution of Fick second law was modified combining the time effect of apparent diffusion coefficient of chlorine ion. The revised model was verified by comparing the measured values and the fitted values. The results show that the surface chloride ion concentration of the component is proportional to water-binder ratio, and the proportionality coefficient follows the statistical law of normal distribution. The surface

收稿日期:2017-01-16

基金项目:辽宁省交通科技项目(201512)

作者简介:何化南(1972-),女,黑龙江哈尔滨人,副教授,工学博士,E-mail:hehuanandl@163.com。

chloride ion concentration of component decreases with the distance from the coast increasing and they follow the exponential relationship. The fitted values calculated by the modified chloride ion diffusion model can envelop most of the measured values, and the fitted results are partial safety.

**Key words:** concrete structure; chloride ion diffusion model; Fick second law; surface chloride ion concentration; water-binder ratio

0 引言

氯离子在混凝土中的扩散被认为是引起钢筋锈蚀和降低结构耐久性的主要原因<sup>[1]</sup>。为了研究实际工况中氯离子对混凝土的侵蚀机理和规律,许多学者以 Fick 第二定律为基础,采用实验室模拟真实环境或现场对结构进行钻芯取样等方式,通过建立氯离子扩散模型来预测其剩余使用寿命,进而评价在役结构的耐久性<sup>[2-9]</sup>。氯离子在混凝土基体中的传输机理比较复杂,扩散被认为是大气环境中的主要传输方式。氯离子的质量分数差是氯离子在混凝土内部扩散的主要动力。当混凝土内外氯离子质量分数差越大时,表面氯离子质量分数越大,氯离子向混凝土内扩散得越多。因此,在对混凝土桥梁进行耐久性设计、评估时,表面氯离子质量分数是需要考虑的重要参数<sup>[10]</sup>。对于沿海混凝土桥梁,距海岸的距离是关键的影响因素,它通过影响混凝土的表面氯离子质量分数改变混凝土桥梁的使用寿命。因此,针对距海岸距离对 Fick 第二定律进行修正有很大的现实意义。

目前,McGee 等<sup>[11-12]</sup>提出了与距海岸距离有关的混凝土表面氯离子质量分数  $c_s$  的计算公式,该公式表明混凝土的表面氯离子质量分数先是保持不变然后迅速减小,最后在距海岸距离 3 km 左右达到稳定,适用范围较小;赵尚传<sup>[13]</sup>验证了混凝土结构表面氯离子质量分数随着距海岸距离的增大先迅速减小,超过 1 km 以后结构表面氯离子质量分数介于 0.02%~0.06%之间,且随距海岸距离增加而缓慢减小。由此将水平区域划分为重度、轻度盐雾区,并规定这 2 个区域的  $c_s$  分别为一个固定值,误差较大;武海荣<sup>[14]</sup>由于缺乏距海岸距离的数据,于是将万宁地区氯离子沉降量与距海岸距离的关系作为研究依据,由该地区的氯离子沉降量来推算表面氯离子质量分数,继而建立了 0~3 km 范围内的表面氯离子质量分数  $c_s$  和距海岸距离的关系式,这种间接计算的方式存在一定的误差。

本文针对以前研究存在的问题,研究了距海岸距离为 5~40 km 的沿海钢筋混凝土桥梁。首先分

析了表面氯离子质量分数和水胶比的关系,将研究对象划定为水胶比为 0.60 的构件。之后在研究氯离子质量分数的影响因素时主要考虑了表面氯离子质量分数实测值与拟合值的比例系数以及距海岸距离这 2 个因素,结合氯离子扩散系数的时间效应,基于 Fick 第二定律提出氯离子扩散修正模型,从而更加准确地预测沿海地区既有混凝土桥梁的剩余使用寿命,为今后分析和评价沿海公路桥梁的耐久性能提供可靠依据。

1 试验概况

1.1 试验对象

为研究沈山(沈阳—山海关)高速公路沿线钢筋混凝土桥梁的氯离子侵蚀规律,依托辽宁省交通科技项目“基于客货分离的既有高速公路评价和改造技术研究”,课题组自 2015 年至今对沈山高速公路沿线 25 座钢筋混凝土桥梁进行了氯离子质量分数的检测试验。桥梁按区域分类,可分为绥中、葫芦岛、锦州、盘锦 4 个区域,其中山海关至锦州段全长 170 km,于 1997 年 7 月开工建设,1999 年 9 月建成通车交付使用;锦州至沈阳段全长 190.4 km,于 1997 年 7 月开工建设,2000 年 9 月建成通车交付使用。4 个区域的环境条件见表 1,其中数据均为年平均值。将这 25 座桥梁依次编号,编号按照绥中至盘锦的沿线顺序。

表 1 环境条件  
Tab. 1 Environmental Conditions

区域	气温/℃	降水量/mm	平均风速/(m·s <sup>-1</sup> )
绥中	9.95	630	2.6
葫芦岛	9.00	600	3.5
锦州	8.50	590	
盘锦	9.20	650	3.5

1.2 取样位置和测试方法

取样部位包括护栏基座、防撞墙、边板腹板、边板底板、中板底板、台帽、台身、盖梁、墩柱 9 个。护栏基座取样点选在距基座顶部 5 cm 处,钻孔深度为 4 cm,钻孔间隔取为 1 cm,以下钻孔间隔相同;防撞墙在距墙顶部 10 cm 处向基座方向以 10 cm 或 5

cm 为间隔取 3 个点,每个取样部位钻孔深度同护栏基座;边板腹板在距板底 5,10 cm 或 20 cm 处向上以 3,5,10 cm 或 20 cm 的间隔取 3 个点,钻孔深度为 3 cm;边板底板、中板底板以距板边或相邻板 10, 20,30,40 cm 或 60 cm 处为起点,以 10 cm 或 20 cm 为间隔取 2 个点,每个取样点钻孔深度为 3 cm;台帽取样点选在距板底 5,10,15 cm 或 20 cm 处为起点,向下以 5 cm 或 10 cm 为间隔取 3 个点,每个取样点钻孔深度为 4 cm;台身以距台帽底部 80 cm 或 160 cm 为起点,以 10 cm 为间隔取 3 个点,每个取

样点钻孔深度为 4 cm;盖梁取样位置为距板底 30 cm 或 50 cm 处向下或者距盖梁底部 20 cm 或 40 cm 处向上以 10 cm 或 20 cm 为间隔取 3 个点,每个取样点钻孔深度为 4 cm;墩柱取样位置为距盖梁底部 160 cm 或 180 cm 向下以 10 cm 为间隔取 3 个点,每个取样点钻孔深度为 4 cm。取样方案如表 1 所示。

氯离子质量分数依据《建筑结构检测技术标准》进行测试,得出的氯离子质量分数为自由氯离子质量分数占混凝土的质量比。

表 2 取样方案  
Tab.2 Sampling Scheme

取样位置	取样起点	间隔	取样点个数	钻孔深度/cm
护栏基座	距基座顶部 5 cm			4
防撞墙	距墙顶部 10 cm	向基座方向 10 cm 或 5 cm	3	4
边板腹板	距板底 5,10 cm 或 20 cm	向上 3,5,10 cm 或 20 cm	3	3
边板底板 中板底板	距板边或相邻板 10,20,30,40 cm 或 60 cm	10 cm 或 20 cm	2	3
台帽	距板底 5,10,15 cm 或 20 cm	向下 5 cm 或 10 cm	3	4
台身	距台帽底部 80 cm 或 160 cm	10 cm	3	4
盖梁	距板底 30 cm 或 50 cm	向下 10 cm 或 20 cm	3	4
盖梁	距盖梁底部 20 cm 或 40 cm	向上 10 cm 或 20 cm	3	4
墩柱	距盖梁底部 160 cm 或 180 cm	向下 10 cm	3	4

2 现有的氯离子扩散模型

通常采用 Fick 第二定律进行氯离子侵蚀机理分析,并以此为基础通过考虑单个因素或多因素对 Fick 第二定律进行修正,以建立适用于研究对象的氯离子扩散模型。

2.1 理论基础

Fick 第二定律假定混凝土为各向同性的均质材料,且混凝土不和其中的氯离子发生反应。该定律首次由 Collepardi 等<sup>[15]</sup>应用于混凝土材料的研究中,后来被普遍用于研究混凝土中氯离子的扩散现象。计算时主要基于误差方程解,在考虑初始条件和边界条件的基础上拟合混凝土中的氯离子质量分数,以此计算其预测值。

Fick 第二定律的扩散方程为

$$\frac{\partial c}{\partial t}=D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \tag{1}$$

式中: $c$  为氯离子质量分数; $t$  为扩散时间; $D$  为扩散系数; $x$  为取样深度。

初始条件: $t=0,x>0$  时, $c=c_0$ 。

边界条件: $x=0,t>0$  时, $c=c_s$ 。

通过计算得到氯离子扩散模型如下<sup>[16]</sup>

$$c=c_0+(c_s-c_0)[1-\operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})] \tag{2}$$

式中: $c_0$  为初始氯离子质量分数。

式(2)通常用于计算混凝土结构的使用寿命,但是理想化了氯离子扩散和 Fick 第二定律的边界条件,导致误差较大以至于无法广泛应用于工程实际中,但其仍是各种改进扩散模型的基础。

假定混凝土结构投入使用总时间远大于开始使用时的龄期,在式(2)中,混凝土初始氯离子质量分数  $c_0$  为 0。这时式(1)的解析解可写为

$$c=c_s[1-\operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}})] \tag{3}$$

式中: $D_a$  为表观氯离子扩散系数,定义为结构从投入使用到检验时氯离子扩散系数的均值。

Fick 第二定律是解决氯离子在混凝土中扩散的最经典的方法,式(3)被广泛用于拟合计算混凝土距表面某一深度处的氯离子质量分数。

2.2 氯离子扩散模型

McGee<sup>[11]</sup>研究分析了澳大利亚塔斯马尼亚岛上的 1 158 座桥,通过混凝土表面氯离子质量分数的实测数据,建立了表面氯离子质量分数与距海岸距离的关系,即

$$c_s(d)=\begin{cases}2.95\% & d\leqslant 0.1\text{ km}\\1.15-1.18\lg(d) & 0.1\text{ km}<d<2.84\text{ km}\\0.03\% & d\geqslant 2.84\text{ km}\end{cases}\quad (4)$$

式中: $d$  为桥梁距海岸的距离。

文献[12]结合式(3),(4),并考虑了扩散系数与  
水灰比  $w$  的关系,得出的氯离子扩散模型为

$$D=0.15D'\frac{1+\rho_c/w}{1+\rho_cw+\rho_c a/\rho_a}(\frac{\rho_cw-0.85}{1+\rho_cw})^3\quad (5)$$

式中: $a$  为砂灰比; $\rho_c,\rho_a$  分别为水泥和集料的密度;  
 $D'$  为无限稀释溶液氯离子扩散系数。

水灰比由鲍罗米公式计算,即

$$w=\frac{27}{f'_{\text{cyl}}+13.5}\quad (6)$$

式中: $f'_{\text{cyl}}$  为混凝土圆柱体抗压强度标准值。

武海荣<sup>[14]</sup>将万宁地区的实测数据作为分析混  
凝土表面氯离子质量分数的依据,建立了混凝土表  
面氯离子质量分数和距海岸距离之间的关系,即

$$c_s=\frac{0.11}{d-0.410\text{ 2}}\quad (7)$$

结合环境因素及扩散系数的时间效应得

$$c=c_s[1-\text{erf}(\frac{x}{2\sqrt{k_{\text{cl}}k_{\text{T}}D_0t_0^n t^{1-n}}})]\quad (8)$$

式中: $k_{\text{cl}}$  为大气中氯离子质量分数对混凝土表观扩  
散系数的影响系数; $k_{\text{T}}$  为环境温度对表观扩散系  
数的影响系数; $t_0$  为基准时间; $D_0$  为基准时间  $t_0$  时的  
扩散系数; $n$  为氯离子扩散系数的龄期系数。

3 氯离子扩散模型的修正

3.1 表观扩散系数

不同于假定的恒定值,氯离子扩散系数是一个  
变化值,与时间、距混凝土表面的距离、配合比、变  
形、密实度、环境(相对湿度和温度)、大气中氯离子  
质量分数以及混凝土与氯离子的结合作用等因素有  
关,与氯离子的来源无关。研究混凝土中氯离子的  
扩散机理时,忽略时间对氯离子扩散系数的影响缺  
乏合理性<sup>[17]</sup>。Mangat 等<sup>[18]</sup>结合其他研究学者的试  
验数据,通过室外模拟试验,首次将表观扩散系数和

时间通过数学关系式表达出来,公式如下

$$D_a=D_0(\frac{t_0}{t})^n\quad (9)$$

文献[19]中根据环境分类和水泥的种类给出了  
 $n$  的参考值,见表 3,本文取  $n$  值为 0.65。式(9)已  
被普遍运用于结构耐久性评估中<sup>[20-22]</sup>。

表 3  $n$  的参考值

Tab. 3 Reference Values of  $n$

适用环境	不同材料下的 $n$ 值			
	普通硅酸盐水泥	粉煤灰	硅粉	矿渣
近海大气区	0.65	0.66	0.79	0.85

本文采用经验做法,取  $t_0=28\text{ d}$ 。参照模拟真  
实环境的试验数据,该模拟试验的过程主要依据文  
献[23]标准,表 4 列出几个具有代表性的参考数据。

出于安全性考虑,采用文献[24]的结果,得 28 d  
氯离子扩散系数  $D_{28}$  为

$$D_{28}=10^{-12.06+2.4b}\quad (10)$$

式中: $b$  为水胶比。

3.2 表面氯离子质量分数

3.2.1 表面氯离子质量分数和水胶比的关系

本文氯离子检测方法为钻孔取样,以 1 cm 为取  
样间隔,定义表面氯离子质量分数为取样深度 0~1  
cm 处氯离子质量分数的平均值,即 0.5 cm 处的氯  
离子质量分数。通过对数据整理,本文将水胶比为  
0.36,0.45,0.60 的桥梁构件分类处理,见图 1。图  
1 中 22,24 表示 22,24 号桥梁,BF 表示边板腹板,  
BD 表示边板底板,Z 表示柱。由于取样点较多,共  
获得 395 条氯离子质量分数和取样深度的关系曲  
线,因此图 1 中每个点代表 2~6 个取样点的平均  
值。由图 1 可以看出:水胶比为 0.36 时  $c$  随着  $x$  先  
下降,然后在取样深度为 2.5 cm 处升高;水胶比为  
0.45 时,氯离子质量分数  $c$  随着取样深度  $x$  的增  
加而迅速降低;水胶比为 0.60 时  $c$  随着  $x$  缓慢下  
降,下降趋势逐渐减缓;随着水胶比的增加,表面氯  
离子质量分数逐渐增加;表面氯离子质量分数与水  
胶比呈正比例关系。

表 4 参考数据

Tab. 4 Reference Data

数据来源	环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	NaCl 溶液质量分数/ $\%$	养护条件	暴露条件
文献[21]	20	15	标准养护 28~56 d	室内浸泡 28 d
文献[20]			28 d	
文献[25]	20	15	标准养护 28 d	室内浸泡 35 d
文献[18]	16~20	3	室内养护 14 d	现场和室内
文献[26]	30	15	标准养护 28 d	室内浸泡 60 d

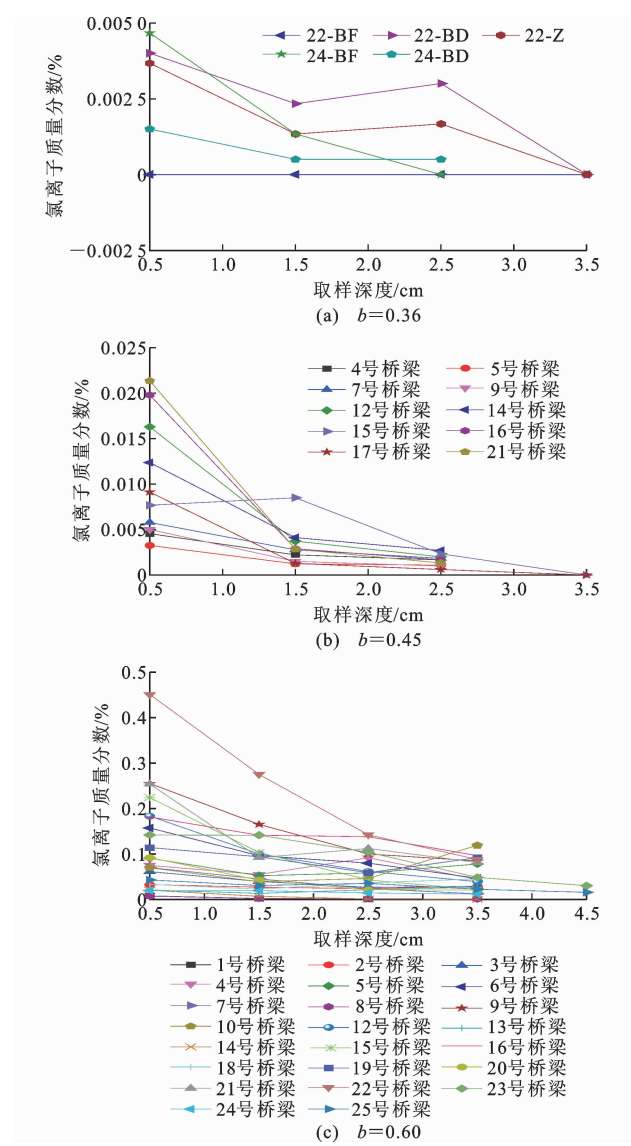


图 1 不同水胶比时氯离子质量分数和取样深度的关系  
Fig. 1 Relationship Between Chloride Ion Concentrations and Sample Depths with Different Water Binder Ratios

3.2.2 表面氯离子质量分数和距海岸距离的关系

通过研究表面氯离子质量分数和距海岸距离的关系,可以由距海岸距离直接得到用于后续拟合计算的混凝土表面氯离子质量分数,具有很大的工程意义。有研究发现<sup>[3,10]</sup>,近海混凝土中氯离子质量分数随距海岸距离的增加先大幅下降,当距海岸距离大于 3 km 时趋于稳定。

本文研究的沿海桥梁距海岸距离为 5~40 km,由第 3.1 节可知,表面氯离子质量分数随着水胶比的增加而增加,由于  $b=0.60$  的桥梁构件处表面氯离子质量分数最高,是大气区混凝土构件耐久性研究的重点,因此取  $b=0.60$  的桥梁构件作为本文的研究对象。由实测数据将表面氯离子质量分数与距

海岸距离进行拟合,得到的拟合曲线见图 2。由图 2 可以看出:在大气环境作用下表面氯离子质量分数随距海岸距离增加呈一定下降趋势;表面氯离子质量分数变化不大,其值在 0.2% 以内;表面氯离子质量分数与距海岸距离呈指数关系,判定系数  $R^2=0.8$ ,拟合程度较好。

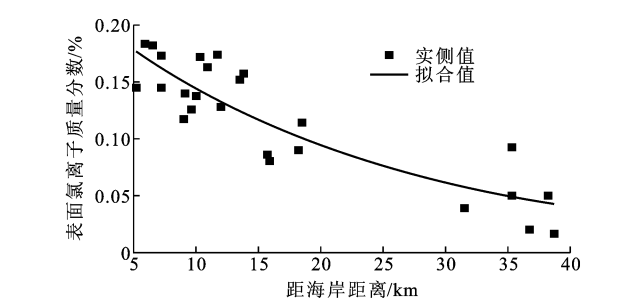


图 2 表面氯离子质量分数随距海岸距离的变化趋势  
Fig. 2 Variation Trend of Surface Chloride Ion Concentration with Change of Distance from Coast

通过拟合得到表面氯离子质量分数  $c_s$  和距海岸距离  $d$  的关系如下

$$c_s=0.22e^{-0.04d} \tag{11}$$

式(11)适用于近海大气环境,其中  $c_s$  为实测表面氯离子质量分数,记为  $c_{sn}$ 。图 3 为氯离子质量分数和取样深度的关系。由图 3 可以看出,表面氯离子实测值一般低于由 Fick 第二定律得到的拟合值,即名义值  $c_{sn}$ ,主要原因在于表面混凝土受冲刷等外界作用,混凝土中氯离子的作用机理并不只是纯扩散,还存在对流作用,出现以上现象的区域称为对流区<sup>[27]</sup>,具体为图 3 所示的实测值数据上升段。一般将名义值作为桥梁耐久性评估的重要参数之一,因此式(11)中的  $c_s$  要转换成  $c_{sn}$  才对混凝土耐久性的研究有意义。

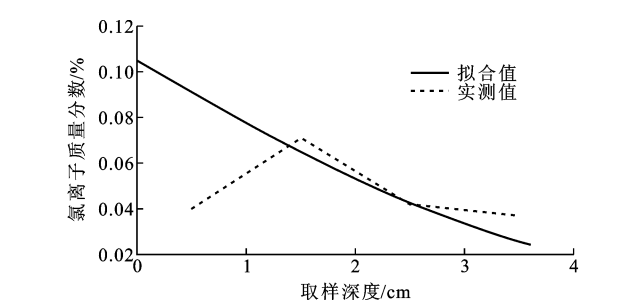


图 3 氯离子质量分数和取样深度的关系  
Fig. 3 Relationship Between Chloride Ion Concentration and Sample Depth

从对沿海混凝土桥梁实测数据的拟合结果可以发现,拟合所得的混凝土表面氯离子质量分数名义值  $c_{sn}$  与实测值  $c_{sa}$  存在着统计上的规律。定义比例

系数  $k_{sn}$  为

$$k_{sn}=\frac{c_{sn}}{c_{sa}}\tag{12}$$

图 4 为  $k_{sn}$  的统计规律。由图 4 可以看出,比例系数  $k_{sn}$  分布有明显的统计规律,判定系数  $R^2=0.96$ ,拟合程度较好,服从正态分布。

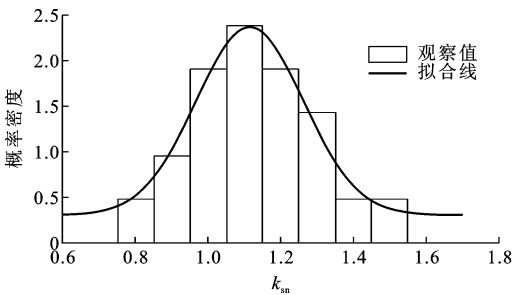


图 4  $k_{sn}$  的统计规律

Fig. 4 Statistical Law of  $k_{sn}$

表 5 给出了沿海桥梁  $k_{sn}$  保证率 90% 和保证率 95% 时的超越概率,为可靠度计算提供依据。由表 5 中数据和式(12)结合表面氯离子质量分数实测值,即可得到拟合值  $c_{sn}$ 。

表 5  $k_{sn}$  的设计参考值

Tab. 5 Design Reference Values of  $k_{sn}$

$k_{sn}$ 均值	标准差 $\sigma$	90% 保证率时 $k_{sn}+1.3\sigma$	95% 保证率时 $k_{sn}+1.645\sigma$
1.17	0.21	1.44	1.52

$k_{sn}$  按式(12)取值,即  $c_{sn}=1.17c_{sa}$ ,则式(11)转换为

$$c_{sn}=0.26e^{-0.04d}\tag{13}$$

由式(13)可得表面氯离子质量分数实测值与拟合值的关系,见图 5。

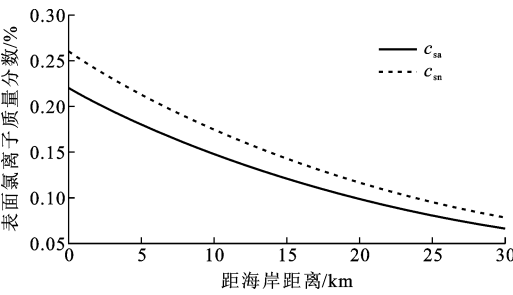


图 5 考虑比例系数的表面氯离子质量分数

Fig. 5 Surface Chloride Ion Concentration Considering Proportionality Coefficient

结合式(3)及上述各模型参数的计算公式,可得基于统计规律和距海岸距离的氯离子扩散修正模型,如式(14)所示

$$c=0.26e^{-0.04d}[1-$$

$$\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{10^{-12.06+2.4b}/(1-n)}t_0^nt^{1-n}}\right)]\tag{14}$$

4 模型验证

本文验证对象为沈山高速公路沿线 25 座桥梁中水胶比为 0.60 的构件。这些部位处的保护层厚度均在取样深度 2~3 cm 的区间内,因此本文模型验证时取 2~3 cm 的中间值,即 2.5 cm 处。利用上述氯离子扩散修正模型[式(14)]及对混凝土表面氯离子质量分数  $c_s$ 、表观氯离子扩散系数  $D_a$ 、龄期系数  $n$  等模型参数的取值方法,计算该处的氯离子质量分数。模型各参数取值见表 6。

表 6 修正模型中各参数取值

Tab. 6 Parameter Values in Modified Model

$t_0/a$	$t/a$	$b$	$n$	$x/\text{cm}$
0.076 7	14,15	0.60	0.65	2.5

通过对比文献[11],[14]中的氯离子扩散修正模型验证本文式(14)的适用性。文献[11]模型是将式(4),(9)代入式(1)计算得出;文献[14]模型是利用式(8)计算得出,其中  $k_{cl}=1,k_T=1$ ,表面氯离子质量分数计算采用式(7),其他计算参数见表 6。

将以上 3 种修正模型计算得到的拟合值与 2.5 cm 处的氯离子质量分数实测值进行对比分析,得到实测值与拟合值的分布曲线,见图 6。

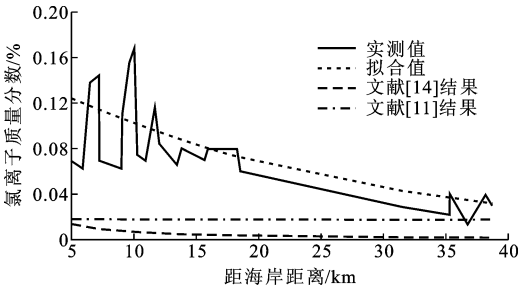


图 6 模型验证

Fig. 6 Model Verification

从图 6 可知:文献[11]将距海岸距离大于 2.84 km 的混凝土表面氯离子质量分数设置为定值 0.03%,得出的结果和 30 km 以外的表面氯离子质量分数值较接近,而 5~20 km 构件的表面氯离子质量分数结果偏小,主要原因在于将表面氯离子质量分数设为定值本身不符合工程实际;文献[14]模型的拟合结果较实测值整体偏小,经分析主要是由于考虑了大气氯离子质量分数修正系数和温度修正系数,且研究对象为距海岸距离 3 km 以内;本文建立的混凝土桥梁氯离子扩散修正模型的拟合值与实测值吻合较好,且能较好地包络大多数测试点,拟合

值较实测值偏安全。

## 5 结 语

(1)水胶比为 0.36 时氯离子质量分数  $c$  随着取样深度  $x$  先下降,然后在取样深度为 2.5 cm 处升高;沿海混凝土桥梁构件水胶比为 0.45 时,氯离子质量分数  $c$  随着取样深度  $x$  的增加而迅速降低,然后趋于稳定;水胶比为 0.60 时  $c$  随着  $x$  缓慢下降;表面氯离子质量分数随着水胶比的增加而增加,且呈正比关系。

(2)在大气环境作用下表面氯离子质量分数均在 0.20% 以内,表面氯离子质量分数随着距海岸距离的增加而呈指数降低。

(3)表面氯离子质量分数实测值与拟合值的比例系数服从正态分布,判定系数  $R^2 = 0.96$ ;表面氯离子质量分数与距海岸距离呈指数关系,判定系数  $R^2 = 0.8$ ,拟合程度较好。

(4)模型对比验证后可知文献[11],[14]模型拟合值均较实测值偏小,本文提出的修正模型拟合值与实测值最为接近,能够包络大多数实测点,修正模型偏安全,可用于计算分析距海岸距离 5~40 km 的钢筋混凝土桥梁。

(5)在考虑混凝土表面氯离子质量分数和距海岸距离的关系时,表面氯离子质量分数与混凝土材料密切相关,水胶比对桥梁表面氯离子质量分数的影响将在今后的研究中结合试验数据进行深入探讨。

## 参考文献:

## References:

- [1] 李淑红. 混凝土中毛细吸水过程的理论及试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.  
LI Shu-hong. Theoretical and Experimental Study on the Capillary Absorption within Concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2011.
- [2] 余红发,孙 伟. 混凝土氯离子扩散理论模型[J]. 东南大学学报:自然科学版,2006,36(增2):68-76.  
YU Hong-fa,SUN Wei. Model Research on Chloride Ion Diffusion in Concretes[J]. Journal of Southeast University:Natural Science Edition,2006,36(S2):68-76.
- [3] 杨绿峰,胡春燕,陈 正,等. 混凝土中氯离子随机时变扩散过程及浓度分布[J]. 建筑材料学报,2013,16(2):210-216.  
YANG Lu-feng,HU Chun-yan,CHEN Zheng,et al. Stochastic and Time-dependent Diffusion of Chloride

Ion in Concrete and Its Concentration Distribution [J]. Journal of Building Materials,2013,16(2):210-216.

- [4] 金祖权,孙 伟,张云升,等. 双因素作用下混凝土对氯离子结合能力研究[J]. 混凝土与水泥制品,2004(6):1-3.  
JIN Zu-quan,SUN Wei,ZHANG Yun-sheng,et al. Research on the Chloride Binding Capacity of Concrete Under Double Damage Factors[J]. China Concrete and Cement Products,2004(6):1-3.
- [5] 姬永生,袁迎曙. 干湿循环作用下氯离子在混凝土中的侵蚀过程分析[J]. 工业建筑,2006,36(12):16-19,23.  
JI Yong-sheng,YUAN Ying-shu. Transport Process of Chloride in Concrete Under Wet and Dry Cycles [J]. Industrial Construction,2006,36(12):16-19,23.
- [6] 刘 芳,金伟良,张 奕. 实际混凝土结构中氯离子结合理论对比分析[J]. 新型建筑材料,2007(6):13-17.  
LIU Fang,JIN Wei-liang,ZHANG Yi. Comparison and Analysis of Chloride Binding Isotherm in Existing Concrete Structure[J]. New Building Materials,2007(6):13-17.
- [7] 马昆林,谢友均,唐湘辉,等. 粉煤灰对混凝土中氯离子的作用机理研究[J]. 粉煤灰综合利用,2007(1):13-15.  
MA Kun-lin,XIE You-jun,TANG Xiang-hui,et al. Research on the Binding Mechanism of Fly Ash and Chloride Ion in Concrete[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization,2007(1):13-15.
- [8] 樊友煌,余红发,张云清. 干湿循环对混凝土在高浓度卤水中氯离子扩散行为的影响[J]. 盐湖研究,2007,15(1):49-54.  
FAN You-huang,YU Hong-fa,ZHANG Yun-qing. Effect of Drying-wetting Cycles on Chloride Diffusion in Concrete Exposed to High Concentration Brine[J]. Journal of Salt Lake Research,2007,15(1):49-54.
- [9] 余红发,孙 伟,麻海燕,等. 盐湖地区钢筋混凝土结构使用寿命的预测模型及其应用[J]. 东南大学学报:自然科学版,2002,32(4):638-642.  
YU Hong-fa,SUN Wei,MA Hai-yan,et al. Prediction Model for Service Life of Reinforced Concrete Structures in Salt Lakes and Its Applications[J]. Journal of Southeast University:Natural Science Edition,2002,32(4):638-642.
- [10] 金伟良,赵羽习. 混凝土结构耐久性[M]. 2版. 北京:科学出版社,2014.  
JIN Wei-liang,ZHAO Yu-xi. Durability of Concrete Structures[M]. 2nd ed. Beijing:Science Press,2014.

- [11] MCGEE R. Modeling of Durability Performance of Tasmanian Bridges [C]//ICASP. Proceedings of the 8th International Conference on Applications of Statistics and Probability. Sydney: ICASP, 1999: 297-306.
- [12] VU K A T, STEWART M G. Structural Reliability of Concrete Bridges Including Improved Chloride-induced Corrosion Models [J]. Structural Safety, 2000, 22(4): 313-333.
- [13] 赵尚传. 基于混凝土结构耐久性的海潮影响区环境作用区划研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27(7): 61-64, 75.  
ZHAO Shang-chuan. Study on Zoning of Marine Environment Based on Concrete Structure Durability [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27(7): 61-64, 75.
- [14] 武海荣. 混凝土结构耐久性环境区划与耐久性设计方法 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
WU Hai-rong. Environmental Zonation on Design Methodology for Durability of Concrete Structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [15] COLLEPARDI M, MARCIALIS A, TURRIZIANI R. Penetration of Chloride Ions Into Cement Pastes and Concretes [J]. Journal of the American Ceramic Society, 1972, 55(10): 534-535.
- [16] 范 宏, 王鹏刚, 赵铁军. 长期暴露混凝土结构中的氯离子侵入研究 [J]. 建筑结构学报, 2011, 32(1): 88-94.  
FAN Hong, WANG Peng-gang, ZHAO Tie-jun. Research on Chloride Penetration for RC Structures After Long-term Exposure [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(1): 88-94.
- [17] LUPING T, GULIKERS J. On the Mathematics of Time-dependent Apparent Chloride Diffusion Coefficient in Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(4): 589-595.
- [18] MANGAT P S, MOLLOY B T. Prediction of Long-term Chloride Concentration in Concrete [J]. Materials and Structures, 1994, 27(6): 338-346.
- [19] 郭冬梅, 项贻强, 程 坤, 等. 沿海混凝土桥氯离子扩散修正模型及其应用 [J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 89-94.  
GUO Dong-mei, XIANG Yi-qiang, CHENG Kun, et al. Revised Chloride Diffusion Model of Concrete Bridge Near Coastal Areas and Its Application [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(5): 89-94.
- [20] LAY S, SCHISSEL P, CAIRNS J. Probabilistic Service Life Models for Reinforced Concrete Structures [R]. Munich: Technical University of Munich, 2003.
- [21] THOMAS M D A, BAMFORTH P B. Modelling Chloride Diffusion in Concrete; Effect of Fly Ash and Slag [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(4): 487-495.
- [22] MAAGE M, HELLAND S, POULSEN E, et al. Service Life Prediction of Existing Concrete Structures Exposed to Marine Environment [J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(6): 602-608.
- [23] ELAHI A, BASHEER P A M, NANUKUTTAN S V, et al. Mechanical and Durability Properties of High Performance Concretes Containing Supplementary Cementitious Materials [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(3): 292-299.
- [24] SHEKARCHI M, RAFIEE A, LAYSSI H. Long-term Chloride Diffusion in Silica Fume Concrete in Harsh Marine Climates [J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(10): 769-775.
- [25] 赵尚传. 氯盐环境下非承载力因素对受弯构件可靠性的影响 [J]. 公路, 2003(9): 12-17.  
ZHAO Shang-chuan. Effect of Non-bearing Capacity Factors to the Reliability of the Flexural Member Under Chlorine Salt Environment [J]. Highway, 2003(9): 12-17.
- [26] 王传坤. 混凝土氯离子侵蚀和碳化试验标准化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.  
WANG Chuan-kun. Standardization Study on Test of Chloride Ion Penetration and Carbonation of Concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [27] 王传坤, 高祥杰, 赵羽习, 等. 混凝土表层氯离子含量峰值分布和对流区深度 [J]. 硅酸盐学报, 2010, 29(2): 262-267.  
WANG Chuan-kun, GAO Xiang-jie, ZHAO Yu-xi, et al. Peak Value Distribution of Surface Chloride Concentration and Convection Depth of Concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(2): 262-267.