

高桩码头部分主要构件的剩余使用寿命预测

徐秀娟

(大连水产学院职业技术学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 通过对高桩码头生命全过程的分析, 给出了码头混凝土构件抗氯离子侵蚀的耐久寿命的定义; 在国内外研究成果的基础上, 确定了普通硅酸盐水泥制成构件氯离子浓度临界值; 根据氯离子扩散理论, 建立梁板式高桩码头主要构件剩余使用寿命的预测模型, 并通过具体实例证明了该模型的有效性。

关键词: 高桩码头; 耐久性寿命; 氯离子临界浓度; 剩余寿命预测

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)08-0056-06

Residual life prediction of main components in high-piled wharf

XU Xiu-juan

(Department of Construction Engineering of Dalian Fisheries College of Vocational and Technical College, Dalian 116023, China)

Abstract: This paper gives a definition of high-piled wharf's residual life intruded by chloride ions through an analysis on its whole process. Critical value of chloride ions in components is made sure based on the research at home and abroad. According to the theory of chloride ions' intrusion, we establish a prediction model of residual life about main components of high-piled wharf, and verify the effectiveness of the model by a practical example.

Key words: high-piled wharf; durability; critical concentration of chloride ions; prediction of residual life

高桩码头构件的使用寿命一般分为3个阶段: 腐蚀诱导阶段(t_1), 即码头建成至钢筋钝化膜破坏所需时间; 腐蚀阶段(t_2), 即钢筋钝化膜破坏至混凝土保护层锈胀开裂时间; 腐蚀破坏阶段(t_3), 即钢筋严重锈蚀致使构件不能安全使用所需时间。一般情况下, 腐蚀阶段和腐蚀破坏阶段相对于腐蚀诱导阶段而言是非常短的, 腐蚀诱导阶段占据了整个混凝土结构使用寿命的绝大部分^[1]。

由于结构的倒塌破坏在没有任何预兆的情况下出现, 会造成巨大的生命财产损失, 因此通常定义结构使用寿命终止并非指结构倒塌, 而是以结构达到某种不能忍受的极限状态为标志。结构使用期可以用 t_2 来定义, 因为到 t_2 阶段甚至 t_1 阶段以后, 一般都要对结构进行维修, 以增加安全性、延长使用年限, 很少有直接使用至结构破坏。结

构从建成使用开始到进行维修加固所经历的时间段称为结构的耐久使用寿命。混凝土结构的耐久寿命可以根据所要求的耐久性极限特征的不同划分为不同的类型, 耐久寿命可以是 $[t_1, t_2]$ 中的任何点。

为简化计算, 本文中设定高桩码头抗氯离子侵蚀的耐久寿命主要是指混凝土结构的腐蚀诱导阶段, 即从结构开始暴露于氯离子环境之日起到混凝土中钢筋表面的氯离子浓度达到某一临界值所经历的时间, 这个临界值一般假定为刚好导致钢筋腐蚀的氯离子的浓度。

1 钢筋混凝土构件氯离子临界浓度的确定

国内外学者、研究单位运用了多种检测脱钝的方式, 如阳极极化、腐蚀电位的变化、腐蚀速

收稿日期: 2012-02-25

作者简介: 徐秀娟(1968—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向是混凝土结构。

率、钢筋表面锈点的特征等,对普通混凝土、掺粉煤灰高性能混凝土、不同品种水泥的混凝土、轻骨料混凝土、混凝土砂浆、混凝土孔隙液以及不同的环境条件等多种情况进行了试验,得到了各种各样的氯离子浓度临界值^[2]。

我国对氯离子浓度临界值的确定也做了大量的工作。通过大量的码头调查、暴露试验和现场取样,得到华南和华东海港码头混凝土结构的氯离子临界浓度分别为(占混凝土)0.091%~0.142%和0.091%~0.15%;国内调查平均值为(占混凝土)0.12%^[3]。

国内得出氯离子临界值的方法:调查现场锈蚀破坏情况,以已经发生锈蚀的钢筋周围氯离子含量的平均值而推算得出。从钢筋开始锈蚀到调查时出现看得见的锈蚀裂缝,氯离子又经过了一段时间的积累,因此,把0.091%作为钢筋锈蚀的氯离子临界浓度是比较符合实际的。交通部第四航务工程局科学研究所湛江港暴露试验站得出的氯离子扩散系数为依据,以0.091%作为氯离子浓度临界值,对海工混凝土构件寿命进行预测,并与实际情况比较,结果相符^[1]。

2 氯离子在混凝土中浓度的预测模型

2.1 预测模型1——Fick第二扩散定律

对于现有的没有开裂的、水灰比较低的结构,大量的检测结果表明氯离子的浓度可以认为是一个线性的扩散过程,一般引用Fick第二扩散定律描述这个扩散过程。有关氯离子在混凝土中扩散的研究是由Collepardi于1970年开始的,并于1972年发表了基于Fick第二定律的氯离子扩散系数的计算结果^[3]。Fick第二定律很方便地将氯离子的扩散浓度与扩散系数和扩散时间联系起来,可以直观地体现结构的耐久性。由于Fick第二定律的简洁性及与实测结果之间较好的吻合性,现在已成为预测氯离子在混凝土中扩散的经典方法。选择Fick第二扩散定律基本上也是基于一种经验的假定,因为模型参数具有明确的物理意义,并且它的解可以很好地拟合现有结构的实测结果^[4-5]。假定混凝土中的孔隙分布是均匀的,氯离子在混凝土

中的扩散是一维扩散行为,浓度梯度仅沿着暴露表面到钢筋表面的方向变化,Fick第二定律可以表示为

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

式中: D 为氯离子在混凝土中的扩散系数(cm^2/s); x 为计算点处的位置(cm); C 为氯离子的浓度,一般以氯离子占混凝土的质量百分比表示; t 为结构暴露于氯离子环境中的时间。Fick第二定律的解取决于问题的边界条件。

2.2 预测模型2

为了研究海洋环境中氯离子侵入混凝土的过程,日本冲绳地区琉球大学的Takeshi Oshiro^[6]在当地海岸边进行试验并提出了以下的假设:混凝土表面的氯离子为定值,扩散系数和表面氧离子浓度按实际情况决定,氯离子一旦到达混凝土表面就开始渗入混凝土内部。

$$\text{初始条件为} \quad C=0 \quad (t=0) \quad (2)$$

$$\text{边界条件为} \quad C=C_f(1-e^{-kt}) \quad (x=0) \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (x=L) \quad (4)$$

式中: C_f 为混凝土表面氯离子的浓度; k 为流入流出系数。边界条件式(4)显示了混凝土表面的氯离子浓度随时间变化的情况。

2.3 预测模型3

田俊峰等^[1]考虑混凝土结构在经过相当长的使用时间以后,表面浓度基本达到饱和,在稳定的使用环境中一般不会发生太大的变化,因此可以假定混凝土表面浓度恒定;另外假定混凝土结构体相对于暴露表面为半无限介质,在任一时刻,相对于暴露表面的无限远处的氯离子浓度值为初始浓度。那么,相应的边界条件和初始条件可以写为:

$$\text{边界条件:} \quad C(0,t)=C_s, \quad C(\infty,t)=C_0$$

$$\text{初始条件:} \quad C(x,0)=C_0$$

根据边界条件和初始条件,式(1)的解为

$$C_{x,t} = C_0 + (C_s - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (5)$$

式中: $C_{x,t}$ 为 t 时刻 x 深度时的氯离子浓度; erf 为误差函数, $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} z \int_0^z \exp(-z^2) dz$; C_s 为表面浓度; C_0 为初始浓度。

Fick第二定律描述的是一种稳态扩散过程。实际上，混凝土是一种水硬性材料，其水化过程需要经过很长的时间才能完成。混凝土的成熟度对于氯离子的扩散存在很大的影响，水化越充分，混凝土内部越密实，抗侵蚀能力则越强。随着时间的延长，氯离子在混凝土中的扩散系数不是一成不变的，通过实际检测结果可以发现，龄期较长的混凝土结构的氯离子扩散系数较小。尤其在开始的1~3 a，扩散系数的降低尤为明显，因此扩散系数是一个时间的函数。引入有效扩散系数 D_t ，即结构从开始暴露到检测时扩散系数为均值，式(5)变为

$$C_{x,t} = C_0 + (C_s + C_0)[1 - \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{tD_t}})] \quad (6)$$

同样，有效扩散系数是一个随结构使用时间长度变化的量，认为近似服从下面的关系：

$$\frac{D_t}{D} = \left(\frac{t_0}{t}\right)^m \quad (7)$$

式中： D 为结构暴露时或其他任一时段的有效扩散系数； t_0 为相应于 D 的时间； m 为环境条件系数。

经过一定使用年限后，混凝土的水化作用基本完成，内部微结构的变化基本不再发生，此时氯离子扩散系数趋于一个稳定的值。这一公式仅适用前30 a，30 a以后 D_t 成为一个恒定的值。

2.4 预测模型4

孙伟等^[5]基于Fick第二扩散定律，推导出综合考虑混凝土的氯离子结合能力、氯离子扩散系数的时间依赖性、混凝土结构微缺陷影响的新扩散方程为

$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = \frac{HDt_0}{1+R} t^{-m} \frac{\partial^2 C_{x,t}}{\partial x^2} \quad (8)$$

考虑多种因素作用的混凝土氯离子扩散理论模型为

$$C_{x,t} = C_0 + (C_s - C_0)[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\frac{HDt_0^n}{(1+R)(1-n)} t^{1-n}}}] \quad (9)$$

式中： H 为混凝土氯离子扩散性能的劣化效应系数； R 为混凝土的氯离子结合能力； n 为氯离子扩散系数的时间依赖性常数， $n=0.64$ 。

上述4个模型都是以Fick第二定律为基础而衍

生的，区别在于考虑的影响因素不同，由于模型中的一些参数很难确定，有些只能从定性上加以描述，其实用性还需继续探讨。

在海工混凝土实际应用中，由于规范对钢筋混凝土构件内的氯离子含量有严格控制，构件内氯离子初始浓度很低，为简化计算，设 $C_0=0$ 。将式(6)简化为

$$C = C_s - C_s \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}) \quad (10)$$

当钢筋周围的氯离子浓度达到极限值时，钢筋的钝化膜就会被溶解，从而钢筋开始锈蚀。将钢筋位置 x ，极限氯离子浓度 C_r ，以及通过现场氯化物含量分析拟合，得到的混凝土表面的氯化物含量 C_s 和氯离子的扩散系数 D ，将这些值代入式(10)，就可以求出钢筋开始锈蚀时间 T

$$T = \frac{x^2}{4D[\operatorname{erf}^{-1}(1 - \frac{C_r}{C_s})]^2} \quad (11)$$

结构剩余使用年限=结构耐久寿命 T -竣工投入使用到检测年限 t

$$(12)$$

3 应用实例

现以浙江某发电厂码头腐蚀调查为例，说明如何通过检测混凝土中氯离子含量来预测码头构件的剩余使用年限。该检测码头建于1992年，1994年投竣工投入使用。至检测时已运行16 a。码头所在处设计高水位3.2 m，设计低水位-2.67 m。对码头的各类构件（包括桩、桩帽、轨道梁、纵横梁、剪刀撑、面板底）测定钢筋保护层厚度和氯离子浓度，对所检测构件选取保护层完好的部位进行取样，分别钻取0~20 mm，20~40 mm，40~60 mm和60~80 mm共4个深度处的混凝土粉末样品进行氯离子浓度测定，检测结果见表1。

将试验得到的不同深度 x 处的氯离子浓度 $C(x,t)$ 代入式(10)，可以得到4个关于变量 C_0 和 D 的超静定方程组，通过拟合计算找出最适合的 C_0 和 D 的值，计算结果见表2。

将得到的 C_0 ， D 代入式(11)就可以解出 T ，将 T 代入式(12)，可以得到构件及其各部位氯离子侵入后的剩余使用年限，计算结果见表3。

表1 混凝土中游离氯离子含量分布情况

位置	取样构件	方位	取样高程/m	保护层厚度/mm	氯离子占混凝土浓度/%				
					0~20 mm	20~40 mm	40~60 mm	60~80 mm	
引桥	箱形梁底	西侧	8.61	主筋47.5	0.011 4	0.001 0	0.004 1	0.004 2	
		东侧	8.61	箍筋36.0	0.010 3	0.005 9	0.005 1	0.003 5	
	21#墩台	西侧	7.65	主筋>56.7	0.009 4	0.007 8	0.006 0	0.004 6	
		东侧	6.85	箍筋50.0	0.014 7	0.014 0	0.009 7	0.006 8	
	方桩		2.80	主筋40.7 箍筋32.3	0.092 0	0.024 4	0.008 9	0.005 8	
综合码头1跨	面板底	西侧	7.77	41.8	0.048 2	0.036 3	0.018 8	0.009 0	
		东侧	7.77		0.053 0	0.037 7	0.011 1	0.008 1	
	2#纵梁	南侧	6.55	主筋62.5 箍筋49.7	0.160 9	0.078 8	0.019 2	0.009 1	
		底面	5.75	主筋40.8 箍筋20.1	0.163 8	0.119 1	0.040 3	0.017 5	
	2#排架横梁		5.54	主筋>50.7	0.147 4	0.134 0	0.056 0	0.018 4	
			4.52	箍筋35.3	0.454 8	0.402 7	0.328 8	0.270 0	
	2#排架		2.97	40.0	0.199 7	0.020 0	0.008 9	0.009 3	
	1#管桩		1.97		0.268 8	0.034 7	0.010 2	0.006 3	
	卸煤码头30跨	面板底		7.78	37.4	0.026 2	0.009 6	0.010 0	0.004 6
		前边梁	北侧	6.75	主筋50.7	0.120 3	0.070 3	0.019 9	0.008 1
5.91				箍筋35.3	0.199 8	0.092 0	0.060 5	0.035 2	
轨道梁		北侧	5.91		0.067 1	0.046 7	0.016 6	0.012 4	
		南侧	5.91		0.291 0	0.140 4	0.110 4	0.048 7	
2#纵梁		南侧	5.91	主箍筋>60	0.161 4	0.090 6	0.079 1	0.071 3	
第31排架横梁			5.91	主筋46.7 箍筋33.2	0.070 2	0.055 2	0.022 4	0.010 9	
桩帽			4.18		0.521 9	0.386 9	0.241 0	0.134 4	
水平剪刀撑			5.30	主筋42.0 箍筋33.3	0.245 3	0.169 0	0.070 9	0.043 7	
走道板		南侧	3.00	主筋44.0	0.122 2	0.050 0	0.032 9	0.024 0	

表2 各取样点氯离子表面浓度和有效扩散系数计算值

位置	取样构件	方位	取样高程/m	$C_0/\%$	$D/(10^{-8}\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
引桥	箱形梁底	西侧	8.61	0.013 9	4.67
		东侧	8.61	0.011 3	4.59
	21#墩台	西侧	7.65	0.010 4	9.69
		东侧	6.85	0.017 2	9.65
	方桩		2.80	0.127 8	1.31
综合码头1跨	面板底	西侧	7.77	0.059 7	4.57
		东侧	7.77	0.068 4	3.12
	2#纵梁	南侧	6.55	0.216 9	1.90
		底面	5.75	0.213 4	3.29
	2#排架横梁		5.54	0.493 5	2.70
			4.52	0.195 6	4.48
	2#排架1#管桩		2.97	0.338 0	6.51
			1.97	0.457 7	6.51

续表

位置	取样构件	方位	取样高程/m	$C_0/\%$	$D/(10^{-8}\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
卸煤码头30跨	面板底		7.78	0.029 6	3.13
	前边梁	北侧	6.75	0.159 8	2.32
			5.91	0.229 9	3.74
	轨道梁	北侧	5.91	0.083 8	3.66
		南侧	5.91	0.332 0	4.30
	2#纵梁	南侧	5.91	0.248 6	7.41
	第31排架横梁		5.91	0.089 8	4.02
	桩帽		4.18	0.302 1	4.13
	水平剪刀撑		5.30	0.614 7	6.66
	走道板	南侧	3.00	0.139 0	3.47

表3 氯离子侵入后各构件的剩余使用寿命

位置	取样构件	方位	高程/m	保护层厚度/mm					
				20	30	40	50	60	70
引桥	方桩		2.80	27.5	>30	>30	>30	>30	>30
综合码头1跨	2#纵梁	南侧	6.55		3.5	12.5	24.0	>30	>30
		底面	5.75			4.2	11.0	19.4	29.3
	2#排架横梁		5.54			2.6	8.6	15.9	24.5
	2#排架1#管桩		2.97		9.9	23.9	>30	>30	>30
		1.97		5.3	15.6	28.8	>30	>30	
卸煤码头30跨	前边梁	北侧	6.75	0.4	11.0	25.8	>30	>30	>30
			5.91			1.4	6.7	13.2	20.8
	轨道梁	南侧	5.91					3.1	7.1
	2#纵梁	南侧	5.91					1.4	4.8
	水平剪刀撑		5.30				1.0	4.9	9.6
	走道板	南侧	3.00	0.1	12.5	28.5	>30	>30	>30

4 结论

1) 混凝土中氯离子浓度随扩散深度的增加而下降。

2) 混凝土中氯离子浓度与测点位置有关。在水位变动区到浪溅区的范围内,随着测点高程的增加,混凝土中氯离子浓度逐渐增加,而到大气区后,混凝土中氯离子浓度又随高程的增加而降低。

3) 混凝土中氯离子浓度与构件所处的码头位置及周围条件有关。陆侧混凝土构件的氯离子浓度明显低于海侧混凝土构件中的氯离子浓度。

4) 混凝土中扩散系数与构件强度、制作方式有一定关系。试验测得:预应力构件的扩散系数较小,现浇构件的扩散系数较大,而预制构件的扩散系数略低于现浇构件。

5) 通过氯离子浓度测定发现,钢筋初始锈蚀的时间 T 随构件的位置、构成、混凝土强度等级以及保护层厚度的不同而各有不同。总的来说,浪溅区构件的使用寿命最短,其次是水位变动区、大气区,水下区的使用寿命最长,构件使用寿命随着结构保护层的增加而增加,这与构件的实际破坏情况一致,说明所采用的模型不仅简单而且适用。

6) 由于构件腐蚀阶段和腐蚀劣化阶段的时间很短,假定钢筋腐蚀诱导阶段为钢筋混凝土构件的耐久性寿命,通过计算发现这一假设是可行的。

7) 考虑到从钢筋开始锈蚀到调查时看得见锈蚀裂缝需要一定的时间,可将氯离子浓度0.091%(占混凝土)作为普通硅酸盐水泥构件的氯离子浓度

临界值。

8) 氯离子在混凝土中浓度的预测模型因考虑因素和临界条件的不同而不同，但均存在系数获取困难的缺点。在工程实际应用中可根据结构状况加以简化。

参考文献：

[1] 潘德强,田俊峰,赵尚传. 海工高性能混凝土抗氯离子侵蚀耐久寿命预测[J].中国港湾建设,2002(2):1-6.

[2] Hussain S E, Rasheeduzzafar S E, Al-Musallam A, et al. Factors affecting threshold chloride for reinforcement

corrosion testing in concrete [J].Cement and Concrete Research, 1995, 25: 1 543-1 555.

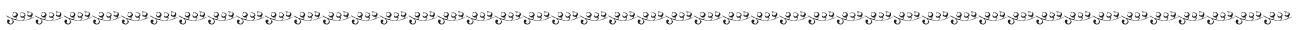
[3] 王胜年,潘德强,卫淑珊,等. 海工混凝土的长期耐久性研究[J].水运工程,2001(8):20-22.

[4] Ervin Poulsen. Chloride profiles: Analysis and interpretation of observation[R]. Demark:AEC Laboratory,1996.

[5] 孙伟,余洪发.混凝土结构工程的耐久性与寿命研究进展[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.

[6] Takeshi Oshiro.Corrosive environment and salt induced damage of structures[R]. Ryukyus: University of the Ryukyus,1999.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第51页)

图4为在不同工况下，坞墩反力/总重分布，此图能直观反映坞墩反力的分布情况。

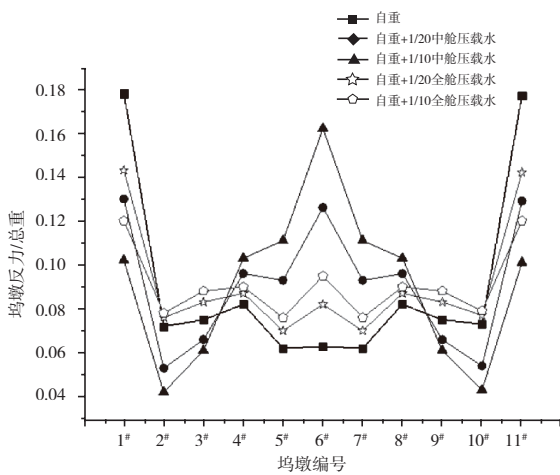


图4 坞墩反力/总重分布

由墩反力增加的数值可见，墩反力的增幅与压载水的增幅成正比关系，可利用这一关系确定压载水的影响。

由表3可知，在全舱灌水的情况下，压载水越重，墩反力越均匀，这和中舱灌水情况相一致。

4 结语

本文基于ANSYS，根据30万吨级油船实际结

构及通常的布墩方式建立了30万吨级油船标准段及坞墩的有限元模型，选取自重及自重和中舱、全舱压舱水的不同工况对坞墩反力进行计算，得出该船型坞墩的横向荷载分布系数。

将计算所得出的30万t油轮坞墩横向荷载分布系数与《干船坞设计规范》给出的系数进行比较，《干船坞设计规范》给出的系数未针对具体船型和工况，比较笼统。本文研究结果显示，大型油轮坞墩横向荷载分布系数具有不同特点，可为干船坞规范的修订提供参考，对以后的设计施工有借鉴意义。

参考文献：

[1] 荒谷俊司.大型船坞的结构设计和施工[M].北京:科学出版社,1978.

[2] 王勖成.有限单元法[M].北京:清华大学出版社,2003.

[3] 王国强.实用工程数值模拟技术及其在ANSYS上的实践[M].西安:西北工业大学出版社,1999.

[4] 博弈创作室.ANSYS7.0基础教程与实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2003.

[5] JTJ 251—1987 干船坞设计规范[S].

(本文编辑 武亚庆)