



# 海港码头氯离子侵蚀环向分布规律研究\*

李志远, 王毅, 金伟良

(浙江大学土木工程学系, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 对乍浦港圆形混凝土柱进行取粉检测, 研究氯离子侵蚀的环向变异性。根据乍浦港的风况、波况, 计算圆形截面混凝土柱在各个方位的累积风速、累积风压和波浪压强的环向分布。并通过灰关联分析得到了累积风速、累积风压和波浪压强与表面氯离子浓度、扩散系数之间的关联度。累积风压由于考虑了贝努利效应, 比累积风速更能反映真实情况。为建立海港码头相似理论及耐久性评估体系提供依据。

**关键词:** 混凝土结构; 干湿交替; 灰色理论; 相似理论

**中图分类号:** TU 375

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2012)08-0082-06

## Circumferential distribution of chloride penetration of seaport wharf

LI Zhi-yuan, WANG Yi, JIN Wei-liang

(Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** The circumferential variability of chloride penetration is analyzed based on the powder inspection collected from circular concrete column in Zhapu port. Then, the cumulative wind velocity, the cumulative wind pressure and wave pressure circumferential distribution at each direction of the circular concrete column are calculated according to the wind regime and wave conditions of Zhapu port. Also, using a grey analysis method, the correlations among the cumulative wind velocity, the cumulative wind pressure, the wave pressure and the surface chloride content, as well as the chloride diffusion coefficient are obtained. Finally, the research highlights the cumulative wind pressure which considers the Bernoulli effect and reflects a much real situation than cumulative wind velocity. The result of this research has a significant contribution to the similarity theory and durability evaluation system of seaport wharf.

**Key words:** concrete structure; wet-dry cycle; grey theory; similarity theory

氯离子侵蚀导致的钢筋锈蚀是造成海洋环境下混凝土结构耐久性问题的主要因素, 处于海水干湿交替区域的混凝土构件受到氯离子侵蚀最为严重<sup>[1]</sup>。干湿交替区的氯离子侵蚀问题一直是混凝土耐久性研究的重点和难点。余红发<sup>[2]</sup>在Fick第二定律的基础上, 提出了考虑氯离子结合和结构微缺陷的扩散方程。张奕<sup>[3]</sup>结合非饱和状态下扩散与对流的耦合关系建立了氯离子在非饱和状态下的运输模型。王晓舟<sup>[4]</sup>建立了干湿交替区表面氯离子

浓度和扩散系数随高程的变化关系。干湿交替区域混凝土中氯离子运输属于孔隙非饱和状态下的离子浓度扩散和对流耦合运输<sup>[3]</sup>。实际环境下的氯离子的运输问题更为复杂。处于海洋环境下的混凝土结构码头, 在服役过程中, 常年累月地受到海风的吹袭、波浪的拍击。在海风的作用下, 混凝土表面水分快速蒸发。蒸发速度越快混凝土表面干燥程度越大, 表层混凝土中孔隙饱和度越小, 表面孔隙负压力越大, 在湿润过程中对溶液

收稿日期: 2012-02-27

\*基金项目: 国家自然科学基金重大国际合作与交流项目(50920105806), 国家科技部国际科技合作项目(2010DFA24590), 交通运输部西部交通建设科技项目(20113288061110)

作者简介: 李志远(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事结构可靠度与混凝土结构耐久性的研究。

吸附能力越强。海水浸没或波浪打击时,提供了氯离子源,氯离子会通过毛细管吸附到混凝土中,导致氯离子分布很大程度上与波浪作用有关。

本文基于对乍浦港区一期2<sup>#</sup>泊位位于上下横梁之间的混凝土圆形柱的耐久性检测,研究海港码头混凝土结构氯离子侵蚀的环向变异性。首次考虑海风、海浪对干湿交替区域氯离子侵蚀的影响。通过灰色理论分析了累积风速、累积风压和波浪压强与表面氯离子浓度、扩散系数的关联度。对海洋环境下混凝土结构耐久性相似理论的建立提供了新的依据。

### 1 乍浦港工程概况

乍浦港地处我国东部沿海,属于亚热带季风气候。该区域夏季盛行SE风,其中7—9月为热带风暴季节,冬季寒潮来临时盛行N和NW风,全年以E~SE风和N~NW风为主,其频率分别为30%和22%,而以SW和WSW向为最小。平均风速和最大风速以E向为甚,其次为NE、NNE、ESE、NW向,而以S、SSW向最小。历年各风向频率、最大风速、平均风速见表1。

表1 乍浦各向风况统计

风向	频率/%	最大风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	平均风速( $m \cdot s^{-1}$ )
N	6	14	3.0
NNE	4	12	2.9
NE	5	15	2.9
ENE	5	15	3.2
E	10	17	4.0
ESE	10	15	4.7
SE	10	15	4.3
SSE	4	10	3.3
S	4	8	3.0
SSW	4	9	2.7
SW	2	13	2.4
WSW	2	12	2.2
W	3	10	2.4
WNW	4	14	3.4
NW	8	15	4.0
NNW	8	14	3.7

乍浦港区位于杭州湾北岸,属半封闭海区,偏东向有舟山群岛作为屏障。本区的波浪特点:常波向为E和NW向,其频率分别为20.1%和20.5%;强波向为E向、ESE向和SE向,最大实测

波高为3.5 m(ESE向,1997年8月18日,对应波周期为7.2 s)和3.0 m(E向,1992年8月31日,对应波周期5.4 s)。就时间分布来讲,5—8月波高较大,其中以8月为最甚,月平均波高为0.4 m,年平均波高为0.2 m,波浪以风浪为主,占全部观测的95%。年平均周期为1.2 s。历年各波向频率、最大波高、平均波高,见表2。

表2 乍浦各向波况统计

波向	频率/%	平均波高/m	最大波高/m	平均周期/s
N	7.6	0.1	0.4	1.0
NNE	2.6	0.1	0.5	1.1
NE	3.6	0.2	1.1	1.2
ENE	3.8	0.3	2.0	1.4
E	20.1	0.2	3.0	1.3
ESE	10.6	0.3	3.5	1.4
SE	10.5	0.2	1.5	1.3
SSE	2.6	0.2	0.7	1.2
S	4.5	0.1	0.8	1.1
SSW	1.4	0.1	0.6	1.1
SW	1.7	0.1	0.5	1.1
WSW	0.7	0.1	0.7	1.1
W	2.1	0.1	0.8	1.1
WNW	2.5	0.2	0.5	1.2
NW	20.5	0.1	0.7	1.1
NNW	5.2	0.1	0.5	1.0

### 2 现场检测方案

研究氯离子侵蚀混凝土设施在环向分布规律,可为混凝土耐久性设计及防护提供依据。乍浦港区一期工程外海码头为1<sup>#</sup>,2<sup>#</sup>泊位,如图1所示。选定一期2<sup>#</sup>泊位工作码头进行现场检测试验,该泊位为千吨级件杂货泊位。一期工程外海码头为通透型高桩梁板式码头,离岸有一段距离。对应于吴淞高程,混凝土面板顶面高程为9.50 m,排架下层横梁顶面高程为4.60 m,主长方向方位角为东偏北15°。

选定码头混凝土中间区域面板下的直径为1 m的混凝土圆柱进行检测,见图2。其各个方向的外部环境比较相似,这样研究检测出的氯离子浓度在其环向上的分布与海风、波浪作用之间的关系才有实际意义。考虑到下横梁及圆形柱所处方位,并欲与海风、波浪作用建立联系,在圆形

柱5.25 m高程位置（吴淞高程），浸润时间比为0.013<sup>[5]</sup>，可认为处于浪溅区。从正北方位（计为S-0°方位角）开始，在其顺时针方向，每隔45°定出一个检测部位，这样共有8个环向上的检测部位，它们依次为S-0°、S-45°、S-90°、S-135°、S-180°、S-225°、S-270°、S-315°，分别对应于N、NE、E、SE、S、SW、W、NW这8个方位。码头柱混凝土强度等级为C25，水泥采用P.S42.5，水灰比为0.45。

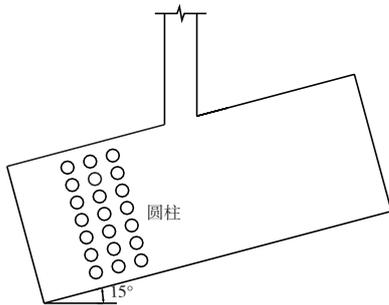


图1 2#泊位位置



图2 现场检测的混凝土圆柱

### 3 氯离子侵蚀环向分布规律

利用快速氯离子测试方法RCT对其进行水溶性氯离子含量的检测，以其占混凝土质量的百分数表示。对用冲击钻钻取的混凝土粉末取1.5 g与RCT氯化物萃取液相混合，振荡5 min并静置24 h。对乍浦港区一期2#泊位下的圆柱混凝土分区段采集粉样，将上述环向氯离子浓度分布曲线不同方位角同一取粉区段的氯离子浓度进行对比，分别是0~7 mm, 7~14 mm, 14~21 mm, 21~28 mm, 28~35 mm, 35~42 mm, 42~49 mm, 49~56 mm, 56~63 mm, 63~70 mm这10个区段。各区段氯离子浓度对比如图3所示。根据Fick第二定律进行拟合，得到了8个方位角混凝土的表面氯离子浓度 $C_s$ 、氯离子扩散系数 $D_a$ 及相关系数 $R^2$ ，见表3。

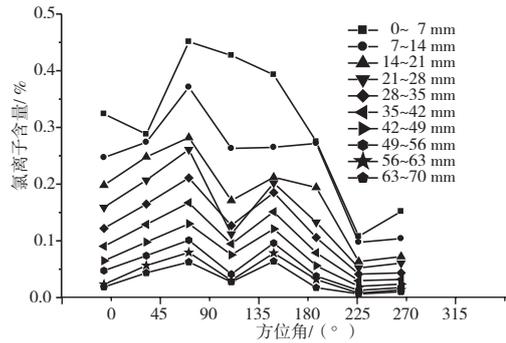


图3 各区段氯离子浓度对比

表3 各方位角氯离子分布曲线参数拟合

方位	方位角/(°)	$C_s$ /%	$D_a/(10^{-6} \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$R^2$
N	0	0.322 1	1.157	0.998 7
NE	45	0.370 0	1.575	0.999 2
E	90	0.457 2	1.712	0.999 0
SE	135	0.341 7	1.170	0.996 8
S	180	0.355 0	2.162	0.996 9
SW	225	0.304 8	1.072	0.989 7
W	270	0.105 9	1.131	0.994 7
NW	315	0.114 7	1.247	0.994 5

通过测试混凝土各方位每一区段内的混凝土氯离子浓度及通过Fick第二定律曲线拟合后发现，混凝土服役一定年限后，各个方位角都受到了不同程度的氯离子侵蚀，表面氯离子浓度在不同方位的差异很大，在W方位 $C_s$ 最小，为0.105 9%；在E方位 $C_s$ 最大，为0.457 2%。氯离子扩散系数之间差异不大，在S方位 $D_a$ 达到 $2.162 \times 10^{-6} \text{mm}^2/\text{s}$ ，均值为 $1.403 \times 10^{-6} \text{mm}^2/\text{s}$ 。各方位表面氯离子浓度和扩散系数如图4~5所示。

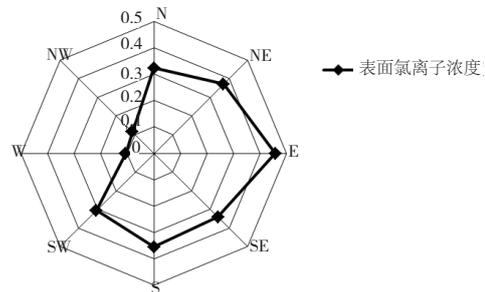


图4 各检测方位表面氯离子浓度分布 (单位: %)

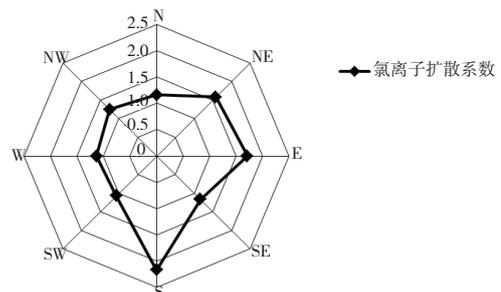


图5 各检测方位氯离子扩散系数分布

### 4 影响因素分析

#### 4.1 海风影响

根据我国《港口工程荷载规范》<sup>[6]</sup>的规定, 风荷载标准值应按下式计算:

$$W_k = \mu_s \mu_z W_0 \quad (1)$$

式中:  $\mu_s$ 是风压体型系数;  $\mu_z$ 是风压高度变化系数;  $W_0$ 是基本风压, 可按下式确定:

$$W_0 = \frac{1}{1600} v^2 \quad (2)$$

式中:  $v$ 为平均风速。地面粗糙度属于A类, 检测部位离水面高约5 m, 故风压高度变化系数 $\mu_z$ 取1.17。圆截面计算局部风压时坐标见图6, 体型系数参考《建筑结构荷载规范》<sup>[7]</sup>, 计算结果见表4。

表4 风荷载体型系数绝对值

$ \alpha-\theta /(^\circ)$	0	22.5	45.0	67.5	90.0	112.5	135.0	157.5	180.0
$\mu_{s\theta\alpha}$	1.00	0.45	0.72	1.45	1.78	0.65	0.52	0.42	0.42

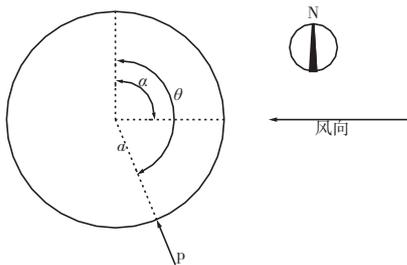


图6 圆截面局部风压坐标

$\mu_{s\theta\alpha}$ 表示方位角为 $\alpha$ 的风在坐标 $\theta$ 处的体型系数。由于研究海风对混凝土结构表面水分蒸发的影响, 所以对体型系数取绝对值。因此不同方位的累积风压可按下式计算:

$$W_{k\theta} = \sum_{\alpha} \varphi_{\alpha} \mu_{s\theta\alpha} W_{0\alpha} \quad (3)$$

式中:  $\varphi_{\alpha}$ 为频率; 不同方位的累积风压见表5。同理, 各方向的频率乘以该方向的风速得到该方向的累积风速。累积风压的最大值在NE向, 压强为10.1 Pa; 最小值在WNW向, 压强为5.4 Pa。累积风速在各个方位上差异很大, 最大值在ESE向, 风速为0.470 m/s; 最小值在WSW向, 风速为0.044 m/s。各方位累积风压与累积风速值分布见图7~8。

$$P = \frac{\rho g H}{\pi K a} \frac{\text{ch}(KZ)}{\text{ch}(Kd)} \left\{ 2 \frac{J'_1(Ka) \sin(\omega t) + Y'_1(Ka) \cos(\omega t)}{[J'_1(Ka)]^2 + [Y'_1(Ka)]^2} \cos\theta - \frac{J'_0(Ka) \cos(\omega t) + Y'_0(Ka) \sin(\omega t)}{[J'_0(Ka)]^2 + [Y'_0(Ka)]^2} \right\} \quad (4)$$

亦可写成:

$$P = \frac{\rho g H}{\pi} \frac{\text{ch}\left(\frac{2\pi z}{L}\right)}{\text{ch}\left(\frac{2\pi d}{L}\right)} [f_3 \sin(\omega t) \cos\theta + f_1 \sin(\omega t) \cos\theta + f_2 \sin(\omega t) - f_0 \cos(\omega t)] \quad (5)$$

表5 各方位累积风压与累积风速值

方位	累积风压/Pa	累积风速/(m·s <sup>-1</sup> )
N	7.3	0.180
NNE	9.4	0.116
NE	10.1	0.145
ENE	8.1	0.160
E	6.7	0.400
ESE	6.2	0.470
SE	6.2	0.430
SSE	6.4	0.132
S	8.0	0.120
SSW	8.7	0.108
SW	8.3	0.048
WSW	7.1	0.044
W	6.2	0.072
WNW	5.4	0.136
NW	5.5	0.320
NNW	5.9	0.296

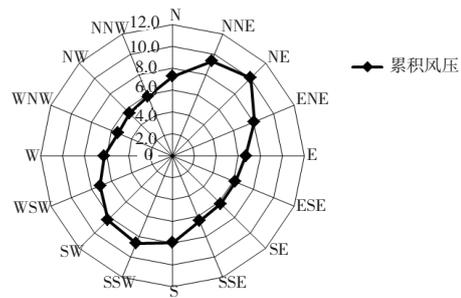


图7 各方位累积风压分布(单位: Pa)

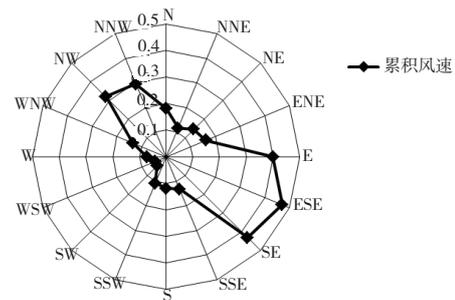


图8 各方位累积风速分布(单位: m/s)

#### 4.2 波浪影响

根据Maccamy线性绕射理论<sup>[8-9]</sup>, 取一阶近似(即 $n=0.1$ ), 圆形柱体表面上任一点环向波浪压强 $P$  (kPa), 在图6坐标系统下可按下式计算:

式中:

$$f_0 = \frac{J_0(Ka)}{Ka\{[J'_0(Ka)]^2 + [Y'_0(Ka)]^2\}} \quad (6)$$

$$f_1 = \frac{2Y'_1(Ka)}{Ka\{[J'_1(Ka)]^2 + [Y'_1(Ka)]^2\}} \quad (7)$$

$$f_2 = \frac{Y'_0(Ka)}{Ka\{[J'_0(Ka)]^2 + [Y'_0(Ka)]^2\}} \quad (8)$$

$$f_3 = \frac{2J'_0(Ka)}{Ka\{[J'_1(Ka)]^2 + [Y'_1(Ka)]^2\}} \quad (9)$$

$f_0, f_1, f_2, f_3$  均和  $D/L$  有关。  $D=1$  m,  $L$  根据文献 [10], 可按下式计算:

$$L=1.17T^2 \quad (10)$$

式中:  $\rho$  为水的密度;  $H$  为波高;  $D$  为圆柱直径;  $a$  为圆形半径;  $d$  为水深;  $L$  为波长;  $K$  为波数;  $\omega$  为波浪频率;  $t$  为时间坐标;  $\omega t$  为波相位;  $z, \theta$  为位置坐标;  $J_0, J'_0, J_1, J'_1$  为各阶第一类贝赛尔函数及其导数;  $Y_0, Y'_0, Y_1, Y'_1$  为各阶第二类贝赛尔函数及其导数。

在波面通过静水面的时刻, 线性绕射理论下出现最大水平波浪力的相位可取为  $\omega t=0$ , 则式(5)可简化成:

$$P = \frac{\rho g H}{\pi} \frac{\text{ch} \frac{2\pi z}{L}}{\text{ch} \frac{2\pi d}{L}} (f_i \cos \theta - f_0) \quad (11)$$

对于同一高程处的圆形混凝土设施随潮汐变化的某一时刻, 位置坐标  $z$  和 水深  $d$  相同。乍浦港区属稳定侵蚀型岸段, 外海码头海床高程在  $-10$  m 以下<sup>[11]</sup>, 可认定前沿检测部位水深大于  $10$  m, 在  $5.25$  m 高程处, 基本可以认为位置坐标  $z$  和 水深  $d$  两个参数之间差值很小, 则式(11)可简化成:

$$P = \frac{\rho g H}{\pi} (f_i \cos \theta - f_0) \quad (12)$$

这说明圆柱表面同一高程处波浪环向压强符合余弦曲线变化规律。在海洋环境下的圆形截面混凝土设施某处环向压强应为各个波向的波浪力在该点的环向压强的累加值, 即:

$$P_\theta = \sum_\alpha \varphi_\alpha \frac{\rho g H_\alpha}{\pi} [f_{i\alpha} \cos(\theta - \alpha) - f_{0\alpha}] \quad (13)$$

式中:  $\varphi_\alpha$  为  $\alpha$  方位波浪的频度。影响各波向环向波浪

力压强参数的计算过程见表6。

表6 各方位波浪压强的计算过程

方位	$L$	$D/L$	$f_0$	$f_1$	波浪压强/Pa
N	1.17	0.85	-0.68	1.18	44.64
NNE	1.42	0.71	-0.81	1.58	59.71
NE	1.68	0.59	-0.82	1.80	75.72
ENE	2.29	0.44	-0.75	2.00	87.95
E	1.98	0.51	-0.81	1.94	95.35
ESE	2.29	0.44	-0.75	2.00	95.15
SE	1.98	0.51	-0.81	1.94	86.43
SSE	1.68	0.59	-0.82	1.80	70.35
S	1.42	0.71	-0.81	1.58	49.99
SSW	1.42	0.71	-0.81	1.58	31.30
SW	1.42	0.71	-0.81	1.58	22.41
WSW	1.42	0.71	-0.81	1.58	21.80
W	1.42	0.71	-0.81	1.58	24.87
WNW	1.68	0.59	-0.82	1.80	27.99
NW	1.42	0.71	-0.81	1.58	30.70
NNW	1.17	0.85	-0.68	1.18	34.61

在计算过程中出现了负的波浪压强, 认为负的波浪压强对氯离子侵蚀混凝土影响很小, 可不将其计入波浪压强累积计算过程中, 令出现负值的压强为0。发现波浪压强在各个方位上差异很大, 最大的波浪力在E向, 压强为95.35 Pa; 最小的波浪力在WSW向, 压强为21.80 Pa。波浪力是氯离子进入混凝土内部的主要外动力, 由于作用频率、周期、波高及方位角的影响, 造成了波浪压强在各方位的变异性(图9)。

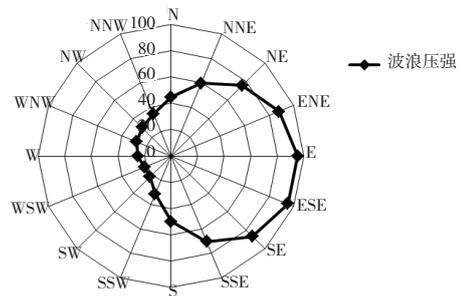


图9 各方位波浪压强分布(单位: Pa)

### 5 灰色关联分析

自然环境下影响氯离子浓度的因素很多, 要想建立起确定性的关系非常困难。灰色系统理论是用来处理小样本、信息不完全和数据少的不确定性问题<sup>[12]</sup>。氯离子侵蚀环向分布影响因素多、机理复杂而且数据较少, 因此采用灰关联分析方法来研究和比较。记标准化后的母序列为  $\{x_0(t)\}$ , 子

序列为 $\{x_i(t)\}$ ,则在 $t=k$ 时,  $\{x_0(k)\}$ 与 $\{x_i(k)\}$ 的关联系数用下式计算:

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \eta\Delta_{\max}}{\Delta_{0i}(k) + \eta\Delta_{\max}} \quad (14)$$

式中: $\Delta_{0i}(k)$ 是 $k$ 时刻两个序列的绝对差; $\Delta_{\max}$ 和 $\Delta_{\min}$ 分别是各个时刻的绝对差的最大值与最小值; $\eta$ 是分辨系数,一般取0.5。两序列的关联度是两序列各个时刻的关联系数的平均值,即:

$$r_{0i} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{0i}(k) \quad (15)$$

混凝土环向表面氯离子浓度及氯离子扩散系数的分布与海风和波浪影响有关,以表面氯离子浓度和氯离子扩散系数为母序列,以累积风速、累积风压和波浪压强为3个子序列,来计算它们之间的关联度,对各序列平均值作无量纲化,灰关联分析中的母序列和子序列见表7。表面氯离子浓度、氯离子扩散系数与累积风速、累积风压和波浪压强的关联度见表8。

表7 灰关联分析的母序列和子序列

方位	$x_{01}(k)$	$x_{02}(k)$	$x_1(k)$	$x_2(k)$	$x_3(k)$
	$C_s$	$D_a$	累积风速	累积风压	波浪压强
N	1.087	0.825	0.840	0.998	0.830
NE	1.248	1.122	0.676	1.384	1.410
E	1.542	1.220	1.866	0.918	1.780
SE	1.153	0.834	2.006	0.853	1.610
S	1.198	1.541	0.560	1.095	0.930
SW	1.028	0.764	0.224	1.143	0.420
W	0.357	0.806	0.336	0.853	0.460
NW	0.387	0.889	1.493	0.757	0.570

表8 各母序列与各子序列之间的关联度

序列	累积风速	累积风压	波浪压强
$C_s$	0.568	0.724	0.707
$D_a$	0.542	0.758	0.631

可以看出,累积风速、累积风压和波浪压力对表面氯离子浓度及氯离子扩散系数的影响程度从大到小均为累积风压>波浪压强>累积风速。累积风压与累积风速这两个变量都是表征海风的影响的,但是累积风压的关联度明显大于累积风速。由于规范在计算风压时考虑了贝努利效应,这样计算得到的风压值是结构局部表面的风压值,更接近真实的情况,反映了混凝土表面水分蒸发的真实信息。而累积风速仅仅是宏观上大概的风速统计结果,比累积风压更加粗略,因此不能真实反映混凝土表面水分蒸发的真实情况。

## 6 结语

1) 对乍浦港区一期2#泊位位于上下横梁之间的圆柱进行了现场检测。在其高程5.25 m处的N向、NE向、E向、SE向、S向、SW向、W向、NW向8个方位,作了取粉试验。表面氯离子浓度在不同方位的差异很大,在W方位最小,为0.105 9%;在E方位最大,为0.457 2%。氯离子扩散系数差异不大,均值为 $1.403 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ ,在S方位达到最大值 $2.162 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ ;

2) 基于乍浦港的风况、波况,得到了圆形截面混凝土柱在各个方位的累积风速、累积风压和波浪压强的环向分布。用灰色理论计算了表面氯离子浓度、扩散系数与累积风速、累积风压和波浪压强的关联度,影响程度从大到小均为累积风压>波浪压强>累积风速。累积风压考虑了贝努利效应,比累积风速更能反映混凝土表面水分蒸发的真实情况;

3) 考虑了海风、波浪对海港码头氯离子侵蚀的作用,对进一步建立海港码头耐久性相似理论及评估体系提供了新的依据。

## 参考文献:

- [1] 金伟良,袁迎曙,卫军,等. 氯盐环境下混凝土结构耐久性理论与设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 25-30.
- [2] 余红发,孙伟,鄢良慧,等. 混凝土使用寿命预测方法的研究I-理论模型[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(6): 686-690.
- [3] 张奕. 氯离子在混凝土中的输运机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [4] 王晓舟,金伟良. 海港码头混凝土结构干湿交替区域氯离子侵蚀规律研究[J]. 海洋工程, 2010, 28(4): 97-104.
- [5] 姚昌建. 沿海码头混凝土设施受氯离子侵蚀的规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [6] JTS 141-1-2010 港口工程荷载规范[S].
- [7] GB 50009-2001 建筑结构荷载规范[S].
- [8] 李炎保,宋初. 墩柱底面波浪和波流浮托力的计算[J]. 港工技术, 1995(2): 1-9.
- [9] 朱大同,左其华. 圆形墩柱上的波浪水平力和浮托力计算[J]. 水运工程, 2000(5): 49-51.
- [10] JTJ 213-1998 海港水文规范[S].
- [11] 浙江省河口海岸研究所测验队. 乍浦港区三期滚装泊位前沿水深测量及扫测技术报告[R]. 杭州: 浙江省河口海岸研究所测验队, 2006.
- [12] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 59-63.