

文章编号:1007-9629(2023)02-0137-06

# 非连续干湿循环对混凝土表层氯离子 迁移的影响规律

周宗隆<sup>1,2</sup>, 钟志恒<sup>1</sup>, 马聪<sup>1</sup>, 刘健<sup>3</sup>, 周海俊<sup>1,4,\*</sup>

(1. 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 2. 深圳地铁建设集团有限公司, 广东深圳 518060; 3. 深中通道管理中心, 广东中山 528400; 4. 深圳大学滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东深圳 518060)

**摘要:**为探究滨海环境中干湿循环的不规律性对混凝土表层氯离子传输的影响, 设计了连续、非连续干湿循环对比试验, 研究了不同干湿循环下水灰比和干湿循环制度对混凝土表层氯离子含量分布规律及对流区氯离子含量变化规律的影响. 结果表明: 当自然风干时间/湿润时间( $t_d/t_w$ )较大时, 由于双向对流与扩散的传输现象, 使得氯离子含量在对流区存在 1 个拐点; 对流区深度基本随水灰比减小而减小; 连续干湿循环下氯离子峰值含量随着  $t_d/t_w$  的减小而增大; 相较于连续干湿循环而言, 非连续干湿循环对表层氯离子含量随深度的变化规律和氯离子峰值含量的影响较大.

**关键词:**混凝土结构; 非连续干湿循环; 混凝土表层氯离子含量; 对流区

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.02.004

## Effects of Discontinuous Dry-Wet Cycles on Migration of Chloride in Concrete Cover

ZHOU Zonglong<sup>1,2</sup>, ZHONG Zhiheng<sup>1</sup>, MA Cong<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>3</sup>, ZHOU Haijun<sup>1,4,\*</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Shenzhen Metro Construction Group Co., Ltd., Shenzhen 518060, China; 3. Shenzhen-Zhongshan Bridge Management Center, Zhongshan 528400, China; 4. Key Laboratory for Resilient Infrastructures of Coastal Cities, Ministry of Education, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** In order to study the effect of the irregularity of dry-wet cycles on chloride transmission in concrete cover under marine environment, comparative tests under continuous and discontinuous dry-wet cycles were carried out. The effect of water-cement ratio and dry-wet cycles regime under different dry-wet cycles on the distribution of chloride content in concrete cover and the change of chloride content in convection zone was studied. The results show that the chloride content has an inflection point in the convection zone due to the transmission phenomenon of bidirectional convection and diffusion when the time of dry-wet ratio ( $t_d/t_w$ ) is relatively high. The depth of convection zone decreases as the mass of water-cement ratio decreases, while the peak chloride content increases with the reduction of  $t_d/t_w$ . Compared with continuous dry-wet cycles, the discontinuous dry-wet cycles have a significant effect on the variation of chloride content with the depth and the peak chloride content in the concrete cover.

收稿日期: 2021-12-16; 修订日期: 2022-01-10

基金项目: 滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室项目(ZDSYS20201020162400001); 国家自然科学基金资助项目(52178233); 广东省住房和城乡建设科技协同创新中心专项课题二(2018B020207015); 广东省科技厅重点研发项目子课题(2019B111106002); 深圳市科技创新委员会孔雀团队项目(KQTD20180412181337494); 广东省珠江学者岗位资助计划项目(GDHVPS2021); 深圳市科技支撑计划项目(GJHZ20210705141802009, JCYJ20220531101605012)

第一作者: 周宗隆(1997—), 男, 江西南昌人, 深圳大学硕士生. E-mail: 1900471014@email.szu.edu.cn

通讯作者: 周海俊(1977—), 男, 浙江永嘉人, 深圳大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: haijun@szu.edu.cn

**Key words:** concrete structure; discontinuous dry-wet cycle; chloride content in concrete cover; convection zone

在滨海环境中,特别是浪溅区,氯离子侵蚀会引起混凝土中钢筋锈蚀、保护层脱落、承载力降低,甚至导致结构垮塌失效<sup>[1-3]</sup>.已有学者针对上述问题进行了探索性研究.张奕等<sup>[4-5]</sup>依据滨海混凝土结构中不同高程和深度的氯离子含量分布,提出干湿循环区域钢筋混凝土结构中氯离子的传输方式除扩散外还包括毛细作用等,导致氯离子侵入速率较大,同时混凝土内部处于饱和、半饱和及干燥状态,因此这些区域混凝土中钢筋的腐蚀最为严重.王传坤等<sup>[6]</sup>提出对流区深度及其对应的氯离子含量与结构使用年限、干湿循环时间比、混凝土孔隙率、孔隙结构及胶凝材料等密切相关,其取值对既有混凝土结构耐久性寿命预测有着极其重要的意义.Li等<sup>[7-10]</sup>通过对比不同干湿循环时间比和循环周期的试验,发现表层氯离子含量随着干湿循环时间比的增加有所增加,内部氯离子含量随着距表面距离的增加而逐渐减小.徐港等<sup>[11]</sup>根据连续干湿循环试验,发现随着干湿循环周期的增加对流区深度先增大后减小,而表层氯离子含量和氯离子峰值含量随之增大.彭立港等<sup>[12]</sup>进行了抗氯离子渗透性能测试,研究表明水灰比越大,混凝土抗氯离子渗透性能越弱,混凝土中氯离子含量越高.同时,盐分结晶物在生成过程中会给材料孔隙内部带来较大的结晶应力<sup>[13]</sup>.因此,明确干湿循环下氯离子在混凝土中的传输特性是混凝土耐久性的核心问题之一.

上述研究往往采用连续干湿循环,而实际工程中由于有效波高呈季节性变化,浪溅区混凝土所处环境存在不连续干湿循环的特征,即间断性暴露于干湿循环条件下,间断时间最长可能达到1 a<sup>[14]</sup>.因此,本文设计了连续、非连续(间断时间为150 d)干湿循环试验,对比研究了氯离子在不同水灰比、不同干湿循环制度下的分布规律,为更好地理解滨海环境中钢筋混凝土结构氯离子侵蚀问题提供重要的基础数据.

## 1 试验

### 1.1 混凝土试件的制作

水泥采用普通硅酸盐水泥P·O 42.5R,密度为 $3.10 \text{ g/cm}^3$ ;细骨料为Ⅱ区级配河砂,细度模数为2.3,表观密度为 $2.58 \text{ g/cm}^3$ ;粗骨料为5~16 mm连续级配碎石,表观密度为 $2.68 \text{ g/cm}^3$ .混凝土的水灰比 $m_w/m_c$ (质量比,文中涉及的含量、水灰比等除特殊说明外均为质量分数或质量比)及配合比见表1.

试件为 $\phi 100 \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱体,脱模后所有试件在 $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\text{RH} \geq 95\%$ 的标准养护室

表1 混凝土的水灰比及配合比  
Table 1  $m_w/m_c$  and mix proportions of concretes

$m_w/m_c$	Mix proportion/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )			
	Water	Cement	Sand	Stone
0.35	250.00	714.29	535.71	800.00
0.45	232.58	516.85	620.22	930.34
0.55	221.15	402.10	671.50	1 005.24

中养护28 d,试件侧面用石蜡进行防水处理.

### 1.2 试验方案

通过人工控制干湿循环的湿润时间 $t_w$ 及自然风干时间 $t_d$ ,对试件进行干湿循环试验,步骤如下:将养护28 d后的试件放入质量分数为5%的NaCl溶液中,在达到湿润时间后取出;擦干表面水分并自然风干,直至本周期结束.干湿循环试验环境温度为 $20 \sim 26 \text{ }^\circ\text{C}$ ,RH为50%~65%,1个周期的时长为7 d.设置3种干湿循环制度,其 $t_d/t_w$ 分别为164:4、160:8、144:24,对应的自然风干时间占比 $t_d/(t_d+t_w)$ 分别为0.98、0.95、0.86.本文自然风干时间明显长于湿润时间,这是为了模拟暴露于浪溅区的海洋工程结构所处的恶劣环境.干湿循环试验分为连续干湿作用(A)组、非连续干湿作用(B)组,其中:A组的干湿循环次数 $n=16$ ,总时长为112 d;B组的总干湿循环次数 $n=32$ ,操作过程为先进行16次干湿循环后,自然风干22个周期,再进行16次干湿循环,总时长为378 d.A、B组试验均包含3个水灰比的混凝土,每个水灰比混凝土均采用3种干湿循环制度,每个工况设有3个试件,因此共有54个试件.数据选取原则为:当相同工况3个试件数据中极值与中间值相差不超过15%时,取三者的算术平均值;当3个试件数据中极值之一与中间值相差超过15%时,取中间值;否则,数据无效.本文试件的编号制度为:A-R35-4表示采用A组干湿循环试验,水灰比为0.35,干湿循环制度中 $t_w=4 \text{ h}$ 的试件,其他类推.

### 1.3 试验方法

使用分层磨粉机将混凝土圆柱体试件从侵蚀表面开始逐层磨粉,分层磨取深度为0~1、1~2、2~3、3~4、4~5、5~7、7~9、9~11、11~15、15~19、19~23、23~27、27~31、31~35 mm的粉末,共14层.将磨取后的粉末过0.3 mm筛,未能通过的粉末先用研钵手动磨细,再次过筛;接着用磁铁吸取粉末中残留的铁屑,铁屑来源于磨粉钻头的磨损;最后将粉末装进自封袋,置于 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘干箱中烘干48 h.根据AASHTO T260-97(2009)《Standard method of test

for sampling and testing for chloride ion in concrete and concrete raw materials》测试混凝土粉末中氯离子含量 $w$ (以混凝土质量计)。

## 2 结果与分析

### 2.1 表层氯离子含量的分布规律

氯离子在混凝土中的传输存在对流区和扩散

区,扩散区的起始深度,即对流区深度记为 $\Delta X$ ,对应的氯离子峰值含量记为 $w_{\max}$ <sup>[16]</sup>。

干湿循环下混凝土氯离子含量随深度的分布图见图1。由图1可见:图中数据的误差棒均较小,可见同一工况3个试件的氯离子含量相差不大;各组混凝土中氯离子含量均随着深度的增加而总体呈下降趋势,随着干湿循环次数的增加而增大。

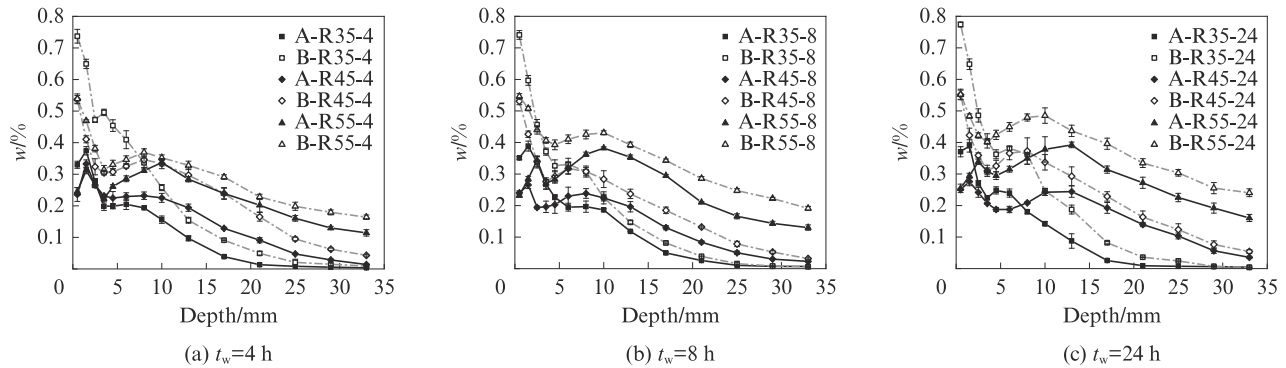


图1 干湿循环下混凝土中氯离子含量随深度的分布

Fig. 1 Distribution of chloride content in concrete with depth under dry-wet cycles

当深度为0~2 mm时,随着深度的增加,A组试件的氯离子含量增大,而B组试件氯离子含量减小。当 $RH \geq 50\%$ 时,氯离子往表面迁移的现象强于往内部迁移<sup>[15]</sup>。同时,在自然风干过程中,表层氯离子一方面由于对流向表面传输,另一方面由于扩散向深处传输,因此会形成混凝土表面和深处的氯离子含量升高,而表层氯离子含量降低的现象。A、B组混凝土在深度为0~2 mm时氯离子含量分布规律不同的原因可能是B组在22个自然风干周期中,其氯离子往表面迁移更剧烈。

试件氯离子含量在对流区存在先下降后回升的现象。这可能是因为试件在干湿循环过程中,表层氯离子存在双向对流与扩散的传输现象<sup>[8]</sup>,即除了湿润过程由毛细作用、扩散作用传输进去的氯离子外,还有因自然风干过程水分蒸发而发生的逆向传输并结晶的氯离子,使得混凝土表层某深度的氯离子含量增加(形成峰值),且当环境的 $RH$ 为 $50\% \sim 65\%$ 时,氯离子往表面迁移强于往内部迁移<sup>[15]</sup>。同时,由于滞后效应,自然风干过程中孔隙液的蒸发对试件浅层孔隙饱和度影响更大,故而会影响氯离子在对流区的分布。类似自然风干过程的干湿循环氯盐侵蚀试验也出现了对流作用导致氯离子逆向迁移的现象<sup>[4,16]</sup>。由于表层氯离子双向对流或扩散的传输现象,使得氯离子含量在对流区存在一个拐点,且水灰比越小,表层氯离子含量分布规律性越好,即拐点处氯离子含量向混凝土内部的变化越平缓,这与文献[4,16]的结论相同。

混凝土表层深度约5 mm内的氯离子含量变化

剧烈,且水灰比越小,氯离子含量极值间的差值越大。研究<sup>[17-18]</sup>认为,导致此现象的原因主要有:(1)低水灰比时,混凝土孔隙率较低,孔径分布趋于小孔径,水分和氯离子在混凝土中传输变得更加困难。另外,水灰比越小,混凝土胶凝材料用量越大,氯离子结合能力更强,对氯离子前进的阻力也就更大;(2)混凝土表层被碳化,会释放出结合氯离子,导致表层的氯离子含量更多。除此之外,可能是因为第1次干湿循环后氯盐进入混凝土发生了盐结晶,导致混凝土孔隙率增大、抗渗性降低,使得B组试件表层氯离子含量变化更为剧烈。

### 2.2 对流区氯离子含量的变化规律

不同工况下混凝土对流区深度和氯离子峰值含量见表2。由表2可见:干湿循环制度对 $\Delta X$ 的影响无明显规律,虽然 $\Delta X$ 随着自然风干时间占比的增大而增大,但当自然风干时间占比大于0.85以后, $\Delta X$ 几乎不再随之变化<sup>[4]</sup>; $\Delta X$ 随着水灰比的减小而减小,这是由小水灰比下试件的低孔隙率、小孔径以及良好的抗渗性决定的,因此能更早达到氯离子峰值含量,而水灰比较大的混凝土孔隙较多,其所能容纳、浓缩和富集的氯离子较多,随着时间的延长,其氯离子含量也会增加并趋于稳定,使其 $\Delta X$ 相对较大。不同强度等级混凝土 $\Delta X$ 不同,这与混凝土自身渗透特性和初始饱和度存在差异有关<sup>[7]</sup>,因此可以认为水灰比较小的混凝土 $\Delta X$ 却较大的个例,可能是由混凝土内水分饱和度的差异所引起的。



由表2还可见:A组试件氯离子峰值含量随着水灰比的减小而减小.究其原因:一方面,因为水灰比越小,混凝土孔隙率越低,孔径分布趋向小孔径,水分和离子的传输更加困难;另一方面,水灰比越小,混凝土中胶凝材料含量越大,结合氯离子能力更强,对氯离子前进的阻碍能力也就更大.进一步对比不同干湿循环制度下,氯离子峰值含量的情况,可以发现A组氯离子峰值含量均随着 $t_d/t_w$ 的减小而增大.这是因为氯离子的积累由自然风干和湿润过程共同决定,当自然风干时间较长时,湿润时间较短会降低氯离子含量.氯离子峰值含量的形成是对流效应和扩散效应耦合的结果,孔隙率、孔隙结构及孔径分布均会对其产生影响,导致B组试件的氯离子峰值含量随着水灰比和干湿循环制度变化的规律性不强,其主要原因可能是在22个自然风干周期中混凝土表面的孔隙结构因氯盐结晶应力而发生了变化.

### 2.3 XRD及压汞分析

针对B组试件表层氯离子含量及对流区变化规律的反常现象,为验证本文推测的合理性,取水灰比为0.35的A、B组试件表层进行XRD及压汞分析.

#### 2.3.1 XRD分析

混凝土表层XRD图谱见图2.由图2可见:干湿循环后,所有混凝土均含有 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、钙矾石

表2 不同工况下混凝土对流区深度和氯离子峰值含量

Group	$m_w/m_c$	$\Delta X/\text{mm}$			$w_{\max}/\%$		
		164:4	160:8	144:24	164:4	160:8	144:24
A	0.35	6.7	7.8	4.5	0.206	0.208	0.248
	0.45	8.0	8.0	11.0	0.238	0.250	0.253
	0.55	10.0	10.0	12.0	0.337	0.382	0.399
B	0.35	3.5	6.0	6.0	0.496	0.331	0.381
	0.45	8.7	6.7	7.3	0.348	0.318	0.384
	0.55	8.0	9.3	9.3	0.369	0.435	0.495

(AFt)、 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{NaCl}$ 和 $\text{MgCl}_2$ ;最高峰为 $\text{SiO}_2$ 的衍射峰,来源于混凝土骨料; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的衍射峰随着湿润时间和干湿循环次数的增加而减小;AFt的衍射峰随着湿润时间和干湿循环次数的增加而增加.由上述XRD分析结果可知:(1)不同干湿循环制度、连续及非连续干湿循环对混凝土水化产物并未产生显著的影响,所有试件均出现了严重的碳化;(2)较长的湿润时间有利于化学反应的进行,消耗了更多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,生成了更多的AFt;(3)未发现除 $\text{NaCl}$ 和 $\text{MgCl}_2$ 以外的其他氯化物,且2组试件中均没有生成Friedel's盐(简称F盐),说明氯离子在干湿循环过程中可能没有对混凝土水化产物发生化学侵蚀.

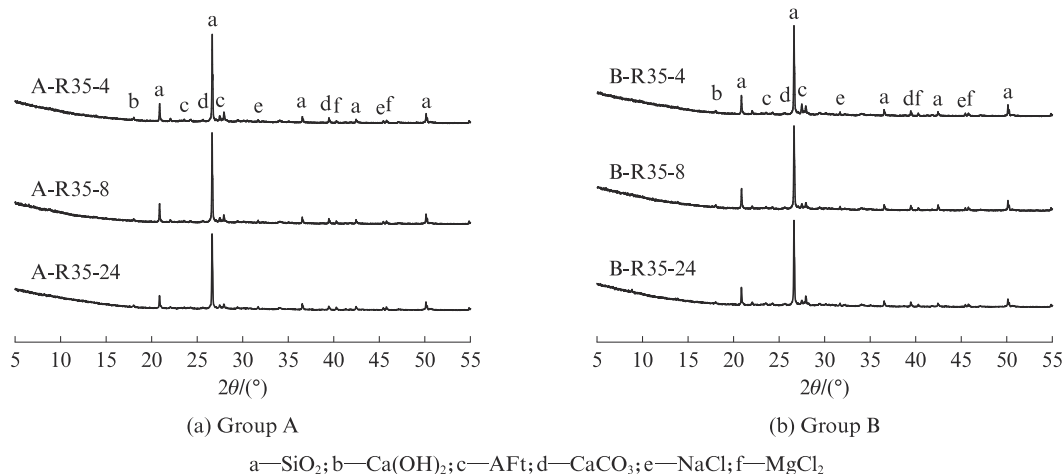


图2 混凝土表层XRD图谱

Fig. 2 XRD patterns of concrete cover

#### 2.3.2 压汞分析

混凝土中的孔隙可分为4类<sup>[19]</sup>:超微孔(孔径 $d \leq 10 \text{ nm}$ )、微毛细孔( $10 \text{ nm} < d \leq 200 \text{ nm}$ )、大毛细孔( $200 \text{ nm} < d < 2000 \text{ nm}$ )、非毛细孔( $d > 20000 \text{ nm}$ ),其中大毛细孔和非毛细孔之间的孔隙可以称为过渡大孔( $d = 2000 \sim 20000 \text{ nm}$ ).陈立军<sup>[20]</sup>研究发现,超微孔孔径小、孔隙率低,不会产生毛细作用,具有很

高的不透水性,对混凝土抗渗性的影响利大于弊;微毛细孔既能产生毛细孔凝结现象,又能产生较大的毛细孔压力和毛细孔渗透力,对混凝土抗渗性的影响弊大于利;大毛细孔的孔隙率虽然较高,但它能降低毛细孔压力和毛细渗透力,减少混凝土的自收缩裂缝,提高混凝土的表面抗渗性和常压渗透性;同时大毛细孔不仅不会吸收湿空气中的水分,孔隙内部

原有的水分还会进入空气中<sup>[19]</sup>,故大毛细孔对经常暴露于空气中混凝土抗渗性的影响利大于弊。

混凝土的孔隙率(体积分数)见图3,其孔结构参数见表3.由图3及表3可见,试件B-R35-4的孔隙率略高于试件A-R35-4,且其 $3\text{ nm} \leq d \leq 10\text{ nm}$ 的孔占比远远低于试件A-R35-4,而其 $10\text{ nm} < d \leq 200\text{ nm}$ 的孔径占比明显高于试件A-R35-4,其余孔径占比基本相同.因此,B组数据的差异性很可能是22个自然风干周期产生的氯盐结晶,使得试件中部分超微孔( $d \leq 10\text{ nm}$ )转化为孔径更大的毛细孔,从而影响了其氯离子渗透。

由上述XRD及压汞分析可知,非连续干湿循环对混凝土表层氯离子含量随深度的变化规律和氯离子峰值含量的影响很大,但对扩散区氯离子含量影响不大.究其原因:(1)首次干湿循环后,氯盐结晶应力导致混凝土表层孔隙率增大、孔隙结构改变,使得

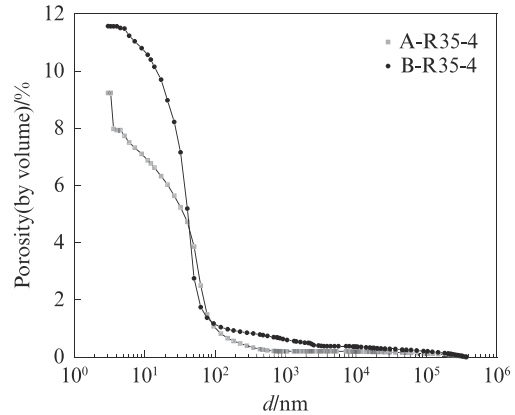


图3 混凝土的孔隙率

Fig. 3 Porosity of concretes

二次干湿循环后表层氯离子含量增大,并影响了对流区氯离子含量的分布规律;(2)混凝土在自然风干阶段会发生持续水化进而起到“自修复”作用,使得混凝土扩散区内部微结构与未经干湿循环无异。

表3 混凝土孔结构参数

Table 3 Pore structure parameters of concretes

Specimen	Unit pore volume/(mL·g <sup>-1</sup> )	Porosity (by volume)/%	Distribution/%			
			3 nm ≤ d ≤ 10 nm	10 nm < d ≤ 200 nm	200 nm < d ≤ 2 000 nm	d > 2 000 nm
A-R35-4	0.053 6	9.24	24.3	70.1	3.4	2.2
B-R35-4	0.068 1	11.57	7.6	84.5	3.6	4.3

### 3 结论

(1)当自然风干时间/湿润时间( $t_d/t_w$ )较大时,由于氯离子在混凝土表层双向对流与扩散的传输现象,使得氯离子含量在对流区存在1个拐点,且水灰比越小,表层氯离子含量分布规律性越好。

(2)对于连续干湿循环试件,在同一干湿循环制度下,对流区深度 $\Delta X$ 和氯离子峰值含量 $w_{\max}$ 随水灰比减小而减小;在同一水灰比下, $t_d/t_w$ 对 $\Delta X$ 影响无明显规律,但 $w_{\max}$ 随 $t_d/t_w$ 减小而增大.对于非连续干湿循环试件,在同一干湿循环制度下,水灰比对 $w_{\max}$ 影响无明显规律,但 $\Delta X$ 随水灰比减小而减小;在同一水灰比下, $t_d/t_w$ 对 $\Delta X$ 、 $w_{\max}$ 的影响均无明显规律。

(3)非连续干湿循环对混凝土表层氯离子含量随深度的变化规律和氯离子峰值含量的影响很大,但对扩散区氯离子含量影响不大。

(4)对于“干湿循环制度对 $\Delta X$ 的影响无明显规律”的论断,还需要对较小 $t_d/t_w$  ( $t_d/(t_w+t_d) < 0.85$ )试件进行验证,同时还需要选取不同的间断时间进行试验,以便更好地研究非连续干湿循环对混凝土表层氯离子含量变化规律的影响。

### 参考文献:

[1] 吴林键,鞠学莉,马原飞,等. 钢筋对混凝土中氯离子扩散的阻挡效应预测模型[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 296-303, 332.  
WU Linjian, JU Xueli, MA Yuanfei, et al. Prediction model of chloride diffusion in concrete considering the blocking effects of rebar[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2): 296-303, 332. (in Chinese)

[2] 康天蓓,刘昱,周静海,等. 干湿循环下废弃纤维再生混凝土氯离子传输性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4): 389-394.  
KANG Tianbei, LIU Yu, ZHOU Jinghai, et al. Chloride transport performance of waste fiber recycled concrete under dry-wet cycles[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4): 389-394. (in Chinese)

[3] 何世钦. 氯离子环境下钢筋混凝土构件耐久性试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2004.  
HE Shiqin. Experimental studies on durability of reinforced concrete members in chloride environment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004. (in Chinese)

[4] 张奕. 氯离子在混凝土中的运输机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2008.  
ZHANG Yi. Study on the transport mechanism of chloride ions in concrete [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)

- [5] 孙丛涛,刘诗群,牛获涛,等.干湿循环条件下钢筋锈蚀的临界氯离子浓度[J].建筑材料学报,2016,19(2):385-389.  
SUN Congtao, LIU Shiqun, NIU Ditao, et al. Critical chloride concentration of rebar corrosion under dry-wet cycles[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2):385-389. (in Chinese)
- [6] 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].硅酸盐通报,2010,29(2):262-267.  
WANG Chuankun, GAO Xiangjie, ZHAO Yuxi, et al. The peak distribution of chloride ion content on the surface of concrete and the depth of convection zone[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2010, 29(2):262-267. (in Chinese)
- [7] LI C Q. Initiation of chloride-induced reinforcement corrosion in concrete structural members-experimentation[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98(4):502-510.
- [8] 刘鹏.人工模拟和自然氯盐环境下混凝土氯盐侵蚀相似性研究[D].长沙:中南大学,2013.  
LIU Peng. Study on the similarity of concrete chloride salt attack in artificial simulation and natural chloride environment [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [9] 李春秋.干湿交替下表层混凝土中水分与离子传输过程研究[D].北京:清华大学,2009.  
LI Chunqiu. Study on the process of moisture and ion transport in the subsurface concrete under alternate drying and wetting [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [10] 卫军,余璟,董荣珍,等.干湿循环条件混凝土内氯离子输运试验拟合与分析[J].东南大学学报(自然科学版),2006(增刊2):150-153.  
WEI Jun, YU Jing, DONG Rongzhen, et al. Fitting research and analysis of chloride transport experiment in concrete under wetting and drying cycles[J]. Journal of Southeast University (Natural Science), 2006(Suppl 2):150-153. (in Chinese)
- [11] 徐港,徐可,苏义彪,等.不同干湿制度下氯离子在混凝土中的传输特性[J].建筑材料学报,2014,17(1):54-59.  
XU Gang, XU Ke, SU Yibiao, et al. Transmission characteristics of chloride ions in concrete under different drying and wet systems[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1):54-59. (in Chinese)
- [12] 彭立港,赵羽习,曾维来,等.再生骨料混凝土界面参数研究[J].建筑材料学报,2022,25(7):737-743.  
PENG Ligang, ZHAO Yuxi, ZENG Weilai, et al. Interface parameter of recycled coarse aggregate concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):737-743. (in Chinese)
- [13] 李荣涛, TUAN C Y. 干湿交替对混凝土中氯离子分布影响的多相耦合数值分析[J].硅酸盐通报,2021,40(2):480-484.  
LI Rongtao, TUAN C Y. Numerical analysis of multiphase coupling on the effect of alternating drying and wetting on the distribution of chloride ion in concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(2):480-484. (in Chinese)
- [14] 高斌.渤海海域波浪场的数值计算与特征分析[D].青岛:中国海洋大学,2012.  
GAO Bin. The numerical simulation and analysis of wave field in bohai sea [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012. (in Chinese)
- [15] ZHU F Z, MA Z M, ZHANG M M. Chloride penetration into concrete under the coupling effects of internal and external relative humidity[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(2):1468717.
- [16] SAFEHIAN M, RAMEZANIANPOUR A A. Assessment of service life models for determination of chloride penetration into silica fume concrete in the severe marine environmental condition [J]. Construction and Building Materials, 2013, 48:287-294.
- [17] SHEN X H, JIANG W Q, HOU D, et al. Numerical study of carbonation and its effect on chloride binding in concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104:103402.
- [18] 陈燕娟.多因素耦合作用下混凝土微结构演化及氯离子传输模拟[D].南京:东南大学,2017.  
CHEN Yanjuan. Simulation of concrete microstructure evolution and chloride ion transmission under multi-factor coupling action [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [19] HAN Y M, HONG S K, DOO S C. Relationship between average pore diameter and chloride diffusivity in various concretes [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(9):725-732.
- [20] 陈立军.混凝土孔径尺寸对其使用寿命的影响[J].武汉理工大学学报,2007(6):50-53.  
CHEN Lijun. The influence of concrete aperture size on its service life [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007(6):50-53. (in Chinese)