

# Temperature and Relative Humidity Response of Concrete in Marine Environment of Qingdao

Yuan Wang<sup>1</sup>, Penggang Wang<sup>1,2\*</sup>, Li Tian<sup>1,2</sup>, Lanqin Wang<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Qingdao University of Technology, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao Shandong

<sup>3</sup>Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong

Email: \*wangpenggang007@163.com

Received: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2019; accepted: Dec. 16<sup>th</sup>, 2019; published: Dec. 23<sup>rd</sup>, 2019

---

## Abstract

Researchers always studied migration mechanism of chloride into concrete through drying-wet cycle test in laboratory. However, dry-wet ratio and drying temperature used by different researchers are totally different, which leads to the incomparability of test results under different acceleration regimes, and there is no consensus on the correlation relationship between acceleration test and exposure test. In this paper, the temperature and relative humidity response of concrete under marine environment of Qingdao are measured, which provides a basis for setting up accelerated test regimes. Results showed that the temperature response of concrete in the splash zone is obviously different from that of air, which shows three typical changing rules. The temperature response of concrete in tidal zone has obvious seasonal characteristics. In winter, the temperature of concrete in high tide area is lower than that of low tide concrete. In other seasons, the internal temperature of high tide concrete is higher than that of concrete in low tide area. The temperature of concrete in underwater area is basically the same as that of seawater. The relative humidity of the concrete in the splash zone is above 95% within 0 - 10 mm, and the concrete at 25 mm and deeper is almost saturated. The concrete in underwater area and tidal area is almost saturated. It is suggested that the dry-wet ratio of accelerated test is 1:5 - 5:1. In the process of accelerated test, it is not recommended to dry the concrete into unsaturated condition, otherwise the migration mechanism of chloride into concrete will be changed, which is inconsistent with reality. It is urgent to establish unified accelerated test regimes which can reflect the real situation of chloride penetration into concrete and the coefficient of acceleration is also needed.

## Keywords

Marine Environment, Temperature Response of Concrete, Relative Humidity Response of Concrete, Dry-Wet Cycle

---

\*通讯作者。

# 青岛滨海环境温湿度作用与混凝土内部温湿度响应

王缘<sup>1</sup>, 王鹏刚<sup>1,2\*</sup>, 田砾<sup>1,2</sup>, 王兰芹<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>青岛理工大学, 山东 青岛

<sup>2</sup>山东省高校蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛

<sup>3</sup>山东建筑大学, 山东 济南

Email: wangpenggang007@163.com

收稿日期: 2019年11月22日; 录用日期: 2019年12月16日; 发布日期: 2019年12月23日

## 摘要

国内外研究人员往往在实验室通过干湿循环试验, 研究氯离子在混凝土内部的传输规律。然而, 不同研究人员采用的干湿比和干燥温度差异性非常大, 导致不同加速制度下的试验结果无法对比, 室内加速试验与暴露试验的相关性也没有达成共识。本文通过实测青岛滨海环境温湿度作用和混凝土内部温度和湿度响应, 为合理设置室内加速试验制度提供依据。研究发现: 浪溅区混凝土内部的温度受潮高、大气温度和太阳辐射的影响变化趋势与大气温度有明显差异, 呈现三类典型的变化规律。潮汐区混凝土内部的温度响应具有明显的季节性特征。冬季, 高潮位混凝土内部温度低于低潮位混凝土内部温度。其他季节, 高潮位混凝土内部温度高于低潮位混凝土内部温度。水下区混凝土内部温度与海水温度基本一致。浪溅区混凝土表层0~10 mm范围以内相对湿度基本维持在95%以上, 混凝土表面下25 mm及更深处混凝土基本处于饱和状态。水下区、潮汐区混凝土内部也基本上处于饱和状态。建议室内干湿循环试验干湿比为1:5~5:1。在进行室内加速试验的过程中, 不建议将混凝土试块烘干, 否则将改变混凝土内部的氯离子传输机理, 与实际不符。亟需建立统一的室内加速试验制度, 并给出加速系数。

## 关键词

海洋环境, 混凝土内部温度响应, 混凝土内部湿度, 干湿循环制度

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着经济的快速发展, 我国基础设施建设飞速猛进, 我国的水泥产量已连续 21 年稳居世界第一, 而且年产量已经超过世界年产量的 60%。但是看似无比坚硬的混凝土材料并不像人们想象的那样坚固、耐久。根据侯保荣院士的腐蚀调查结果[1], 我国 2014 年腐蚀总成本约为 2.1 万亿元, 其中基础设施和交通领域的腐蚀损失高达 3436 亿元。滨海重大基础设施过早失效, 服役寿命短, 严重制约环境保护与经济可持续发展战略的实施。因而, 确保并延长海洋环境重大基础设施服役寿命是急需解决的重大战略问题。首先要解决的一个问题是阐明海洋环境钢筋混凝土结构损伤劣化机理。研究表明, 氯离子侵蚀是引起海

洋环境下钢筋混凝土结构腐蚀破坏最主要的因素。近年来,国内外研究人员在氯离子侵蚀机理方面开展了大量的研究工作。由于长期暴露试验周期较长,而且很多研究机构不具备开展暴露试验的条件,所以诸多研究人员采用室内加速试验研究混凝土中氯离子侵蚀问题。在实验室研究过程中,研究人员通过干湿循环试验加速氯离子侵入过程。然而,国内外研究人员在进行干湿循环试验过程中,采用的干湿比不尽相同。延永东等[2] [3]采用的干湿比为 1:1;刘倩等[4] [5]采用的干湿比为 1:2;徐港等[4] [6]采用的干湿比为 2:1;张奕等[7] [8]采用的干湿比为 3:1;王琴等[9] [10]采用的干湿比为 3:2;Alsaif 等[11]采用的干湿比为 3:4;吕健等[12]采用的干湿比 3:5;Jeedigunta 等[13]采用的干湿比为 4:1;Kawai 等[14]采用的干湿比为 4:3;袁智强等[15] [16]采用的干湿比为 5:1;Tittarelli 等[17]采用的干湿比为 5:2;Wu 等[18] [19]采用的干湿比为 7:1;李永强等[20]采用的干湿比为 7:5;刘奇东等[21]采用的干湿比为 9:1;Zhang 等[22]采用的干湿比为 11:1;李春秋等[23]采用的干湿比为 13:1;刘奇东等[21]采用的干湿比为 14:1;樊友煌等[24]采用的干湿比为 1:17;Chen 等[25]采用的干湿比为 17:7;黄俊等[26]采用的干湿比为 23:1。很明显,不同研究人员采用的干湿比相差非常大。除此之外,不同研究人员采用的干燥温度也截然不同(20℃~60℃)。不同加速制度下的试验结果能否进行对比?加速试验制度下得到的试验结果能否真实反映氯离子侵入过程,加速试验是否改变了氯离子的侵入机理?室内加速试验与暴露试验的相关性如何?上述问题文献中均没有公认的说法。本文通过实测青岛滨海环境不同腐蚀区域混凝土内部的温度、湿度,分析其响应规律,为合理设置室内加速试验制度提供依据,提高海洋环境下钢筋混凝土结构寿命预测精度,保障重大基础设施安全服役。

## 2. 试验方案

### 1) 试验原材料及混凝土配合比

试验采用的水泥为 P·I 52.5 硅酸盐水泥,砂为细度模数 2.6 的河砂,石子为 5~20 mm 连续级配的玄武岩石子,减水剂为减水率为 30% 的聚羧酸高效减水剂,拌合用水为自来水。混凝土配合比如表 1 所示。混凝土 28 天抗压强度为 62 兆帕。

**Table 1.** Proportion mix (Kg/m<sup>3</sup>)

**表 1.** 混凝土配合比(Kg/m<sup>3</sup>)

水灰比	水泥	水	砂	石子	减水剂
0.35	450	157.5	675	1125	2%

### 2) 混凝土试件的制备

成型长×宽×高为 4000 mm × 250 mm × 150 mm 和 400 mm × 250 mm × 150 mm 的混凝土试件。试件成型过程中,将预埋式温湿度传感器埋入混凝土试件内部,监测试件内部温湿度。埋置深度如下:水下区距混凝土表面 10 mm、35 mm;低潮区距混凝土表面 5 mm、10 mm、20 mm、35 mm;中潮区距混凝土表面 5 mm、10 mm、20 mm、35 mm;高潮区距混凝土表面 5 mm、10 mm、20 mm、35 mm;浪溅区距混凝土表面 5 mm、10 mm、20 mm、35 mm。养护 90 天后,将混凝土试件运往海洋暴露站,如图 1 所示。海洋暴露试验站位于北纬 36°03', 东京 120°25' 的青岛市小麦岛。试验区域潮高数据如图 2 所示,数据的零基准为海平面以下 239 cm,从图中可以看出,青岛海域属于典型的半日潮。随着月球、太阳和地球三者所处相对位置不同,潮汐除日变化以外,还会以一月为周期形成两次天文高潮和两次天文低潮。根据潮高数据以及混凝土试件所处位置,计算得到潮汐区混凝土构件的干湿比。低潮位混凝土试件干湿比为 2:10,中潮位混凝土试件干湿比为 6:6,高潮位混凝土试件干湿比为 10:2。

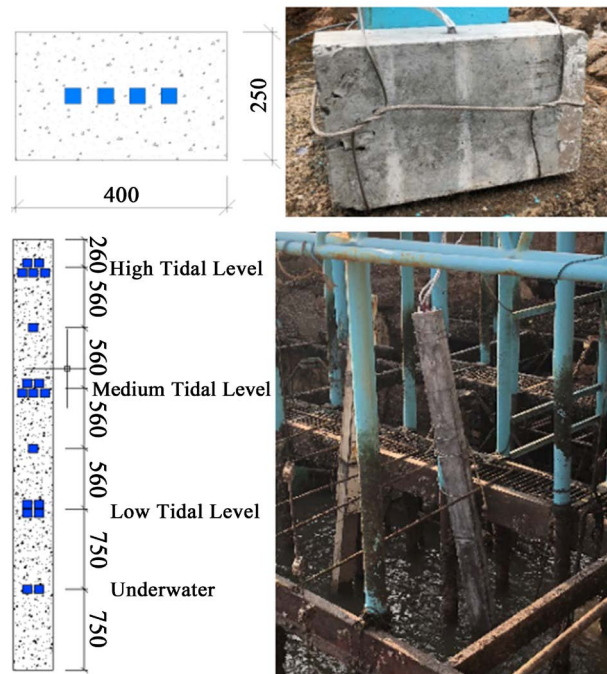


Figure 1. Sensor layout and location of concrete specimens  
图 1. 传感器布置与混凝土试件位置图

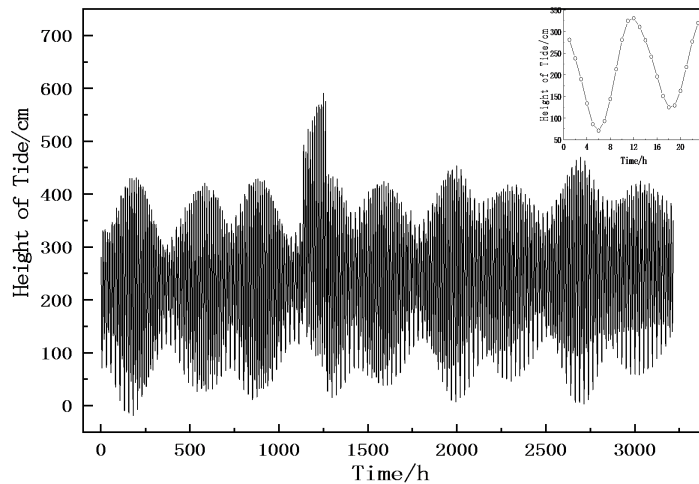


Figure 2. Tidal height VS time around Qingdao  
图 2. 青岛地区潮高随时间变化趋势

### 3. 潮高、温度作用与混凝土内部温度响应规律

#### 3.1. 浪溅区温度作用与混凝土内部温度响应规律

研究发现，受潮高的影响浪溅区大气温度与混凝土内部响应温度呈现如图 3 所示三类规律。第一类规律的特征是混凝土内部响应温度在一天内出现两个紧邻的温峰，且第一个温峰为尖锐峰。这是因为，在该种情况下凌晨开始几个小时海水水位较低，混凝土试件暴露于空气中，由于混凝土导热系数大于海水，导致夜晚的时候混凝土温度低于海水温度。随着海水水位的升高，海水不断溅覆在混凝土表面使其温度升高，达到第一个温峰；落潮后，混凝土表面水分蒸发导致温度迅速降低。但此时已经天亮，受太阳辐射的影响，混凝土

表面温度不会持续降低。由于导热系数差异,受到太阳辐射后混凝土温度比海水温度高,当混凝土内部温度达到最高时,海水正处于低潮位,混凝土试件完全暴露于空气中。随后,海水水位升高,温度较低的海水溅覆在混凝土表面,使混凝土内部温度降低,而且此时太阳辐射强度已经减弱,所以混凝土内部温度缓慢降低。

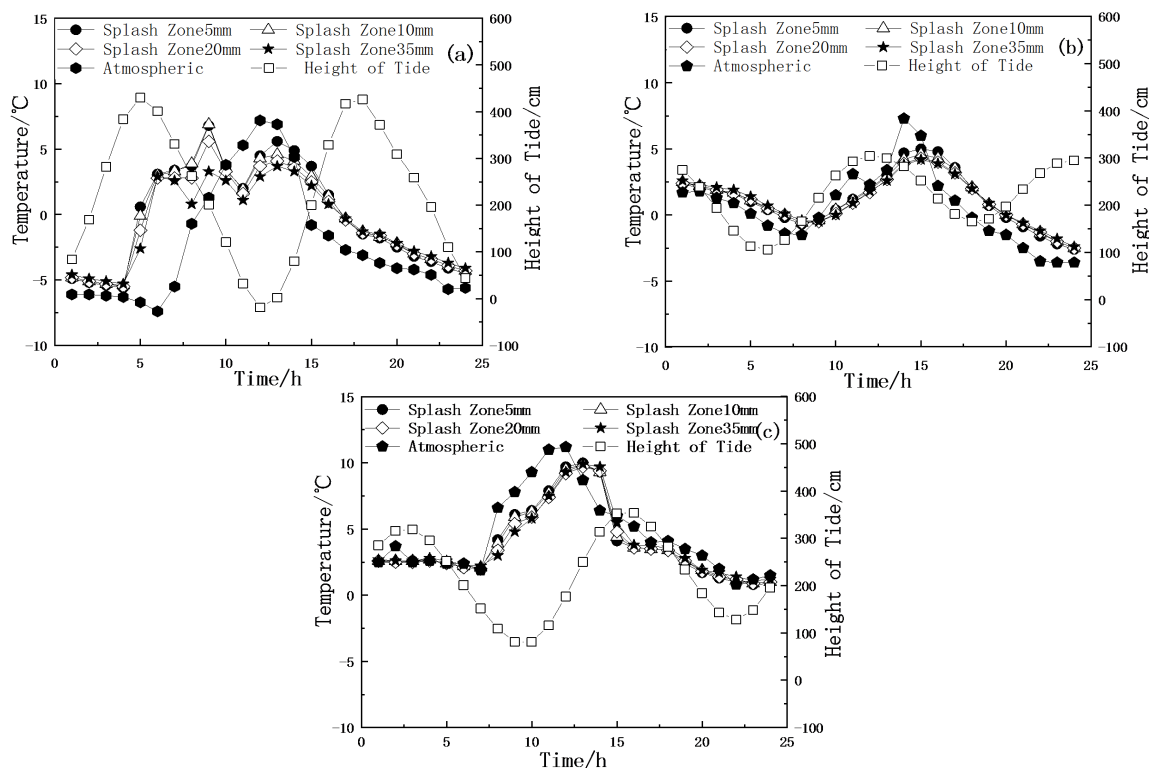


Figure 3. Tidal height, temperature of air and temperature response of concrete in splash zone  
图 3. 浪溅区潮高、温度作用与混凝土内部温度响应

第二类规律的特征是混凝土内部温度响应与大气温度规律类似。这是因为,凌晨 0 点时海水水位较高,海水仍能溅射到混凝土表面,但是此时海水水位在逐渐降低,混凝土内部温度降低。太阳升起后,太阳辐射的影响比海水的影响大,混凝土内部温度几乎与大气温度同步升高。当然,如果此时正处于天文低潮,海水无法溅射到混凝土表面,混凝土内部的温度不受潮水的影响,此时也可能出现该类响应规律。

第三类规律的特征是混凝土内部响应温度在一天内出现一个响应温度峰,且温峰出现后混凝土内部温度迅速降低。这类规律多发生于涨潮峰出现在太阳辐射峰之后,低温海水溅覆导致混凝土温度迅速下降。潮水退去后,由于此时太阳辐射已经减弱,水分蒸发散失的热量比太阳辐射得到的热量大,混凝土内部温度进一步降低。有研究人员将大气温度带入寿命预测模型对海洋环境下混凝土结构进行耐久性设计和寿命预测,这显然不合理。有必要建立混凝土内部响应温度与大气温度的关系模型,这样就可以根据大气温度,以及不同混凝土配合比热物理参数,以及建立的模型,通过换算得到任意位置,任何配合比混凝土内部的温度,评估混凝土的相关性能。

### 3.2. 潮汐区温度作用与混凝土内部温度响应规律

研究发现,低潮区、中潮区、高潮区混凝土内部响应温度随潮高、大气温度变化规律与浪溅区类似,只是混凝土内部温度相对较低,而且较为平缓。但是处于不同潮位处混凝土温度响应有明显差异,而且受季节的影响,如图 4 所示。从图 4(a)可以看出,冬季涨潮时,混凝土内部温度受海水温度影响较大,潮汐区混凝

土所在位置越高其响应温度越低，温度曲线上升的时间越滞后，下降越提前，温峰持续时间越短，但是温峰基本与海水温度相同；落潮时，高潮区混凝土先露出水面，受太阳辐射影响，混凝土内部温度升高，减小与低潮位混凝土的温差。因为冬季太阳辐射强度不高，最终低潮区、中潮区、高潮区混凝土内部温度基本一致。其他季节典型结果如图 4(b)所示，由于春、夏、秋季太阳辐射强度较高，落潮后，不同潮位处混凝土接收的太阳辐射时间不同，导致高潮位混凝土内部响应温度升高最快，而且温峰高于中潮区和低潮区。

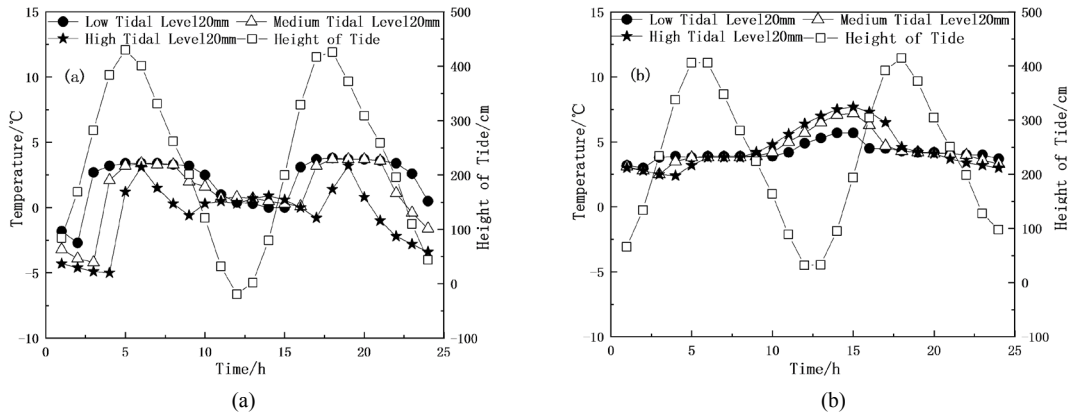


Figure 4. Temperature response of concrete at 20 mm in Different tidal levels varies with tidal height and temperature of air. (a) Typical experimental results in winter; (b) Typical experimental results in spring, summer and autumn

图 4. 不同潮位处混凝土内部 20 mm 处温度随潮高、环境温度的变化规律。(a) 冬季典型结果；(b) 其他季节典型结果

### 3.3. 水下区混凝土温度响应规律

由于处于水下区的混凝土一致浸没在水下，所以其内部的温度只受海水温度影响，基本不受大气温与潮高的影响，如图 5 所示。

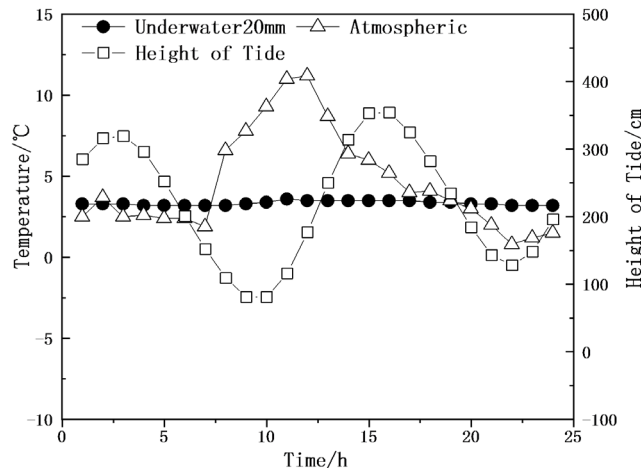


Figure 5. Tidal height, temperature of air and temperature response of concrete in underwater zone

图 5. 潮高、大气温度与水下区混凝土内部温度响应

## 4. 环境相对湿度作用与混凝土内部相对湿度响应规律

### 4.1. 浪溅区环境相对湿度作用与混凝土内部相对湿度响应规律

浪溅区混凝土内部相对湿度变化规律如图 6 所示。从图中可以看出，浪溅区距混凝土表面 5 mm、10

mm 处在大气湿度与海浪的共同作用下相对湿度发生规律性波动，维持在 95% 以内；20 mm、35 mm 深度处相对湿度接近 100%。然而，在 50 小时附近，浪溅区混凝土距表面 10 mm 处相对湿度响应比 5 mm 处剧烈，在 250 小时附近，浪溅区混凝土距表面 5 mm 处相对湿度响应比 10 mm 处相对湿度响应剧烈。出现这种矛盾现象的原因是相对湿度是温度的函数，从图 3 可知，浪溅区混凝土内部的温度是周期变化的。可以通过饱和水气压公式实现相对湿度与绝对湿度(水汽密度)的转变，常用的饱和水蒸气压方程有戈夫-格雷奇公式、马格努斯公式、Buck 公式、Tetens 经验公式等。青岛海域最低温高于  $-10^{\circ}\text{C}$ ，在此温度范围内 Tetens 经验公式计算精度最高。所以选用 Tetens 经验公式将相对湿度换算为绝对湿度(水汽密度)[27]。将图 6 中 5 mm 和 10 mm 处的相对湿度与相对应时刻相同位置混凝土的温度代入 Tetens 经验公式，即可得到混凝土内部 5 mm 和 10 mm 处水汽密度结果，如所图 7 示。将混凝土内部相对湿度换算为水汽密度的形式后，可以明显的发现上文提到相对湿度响应现象矛盾两个时间点，水汽密度响应都是一样的，即距表面 5 mm 处先响应，且响应程度大。这是因为相对湿度是受温度影响的相对量。由于浪溅区混凝土受飞溅浪花的影响，其表层温度可能由于海水的原因低于内部的温度，使得此处的相对湿度较高，体现在相对湿度响应曲线上即为混凝土表层相对湿度响应没有内部相对湿度响应剧烈，或者只有内部响应而表层不响应。当换算为水汽密度后，真实的水汽响应情况得以准确的反映。

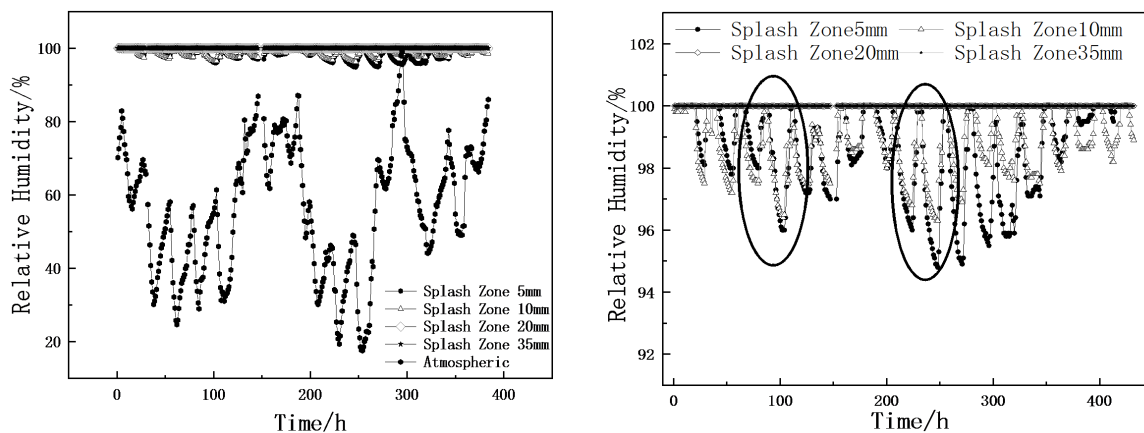


Figure 6. Atmospheric relative humidity and relative humidity response of concrete in splash zone  
图 6. 大气湿度与浪溅区混凝土内部相对湿度

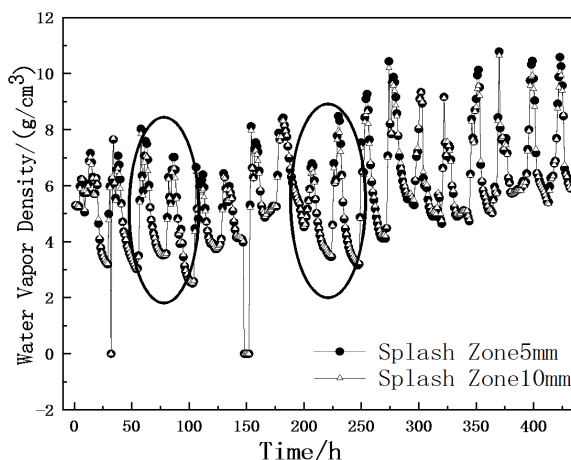


Figure 7. Response of water vapor density at different depths of concrete in splash zone  
图 7. 浪溅区混凝土不同深度处水汽密度响应

## 4.2. 潮汐区与水下区混凝土内部相对湿度响应规律

9个月的连续监测结果表明,潮汐区和水下区混凝土内部相对湿度基本保持在100%。以往研究人员认为处于潮汐区的混凝土试件在干湿循环作用下,混凝土内部湿度也处于饱和与非饱和交替状态。这与本文实测结果矛盾。从3.1节的试验结果我们很明显的看出,位于浪溅区的混凝土,其内部湿度也基本大于95%。相比而言,潮汐区混凝土试件的干湿比远远小于浪溅区,并且位于潮汐区的混凝土试件在一天之内会被海水浸没两次,浸没时间最少的高潮位混凝土试件在每一个涨潮落潮循环期间(青岛海域属于半日潮,一个循环约为12小时),其海水浸泡时间大约2个小时。研究表明[28],非饱和混凝土在接触水分一个小时之内其内部10 mm处已经达到饱和状态。朱方之等[29]研究发现如果要将饱和混凝土试件干燥需要几百甚至几千个小时。考虑到沿海大气环境中的相对湿度较高,加之海水浪溅的影响,高潮位混凝土试件2个小时吸收的水分很难在10个小时内扩散出来,从而导致高潮位混凝土5 mm以内基本保持饱和状态。同样,中潮区、低潮区甚至水下区海水浸没时间更长,混凝土内部保持饱和状态。

另一方面,由于本文采用的混凝土强度等级较高,如果采用低强度等级的混凝土进行暴露试验,试验现象或许会有所不同,有待于深入研究。从氯离子传输机理可知,在饱和混凝土内部氯离子传输驱动力是氯离子浓度差引起的扩散。从这个角度来说,以往研究人员开展室内加速试验采用高温烘干的方法进行混凝土试块干燥不太合理。因为高温作用能够加速水分的散失,使得混凝土表层处理非饱和状态,当对非饱和混凝土试块进行湿润时,由于混凝土的强毛细吸收能力与孔隙“墨水瓶效应”,混凝土试块可以在短时间内吸收大量水分,这与实际情况不符。根据本文实测结果,建议室内加速试验干湿比为1:5~5:1。

文献中的实测结果表明,潮汐区混凝土内部的氯离子侵入量和侵入深度大于水下区,既然潮汐区混凝土内部几乎处于饱和状态,那么加速潮汐区氯离子侵入混凝土的因素可能是温度。潮汐区混凝土内部的温度基本上高于水下区混凝土内部的温度,温度越高,离子活度也越高,离子传输速度也就越快。

## 5. 结论

1) 青岛滨海浪溅区混凝土内部的温度受潮高、大气温度和太阳辐射的影响呈现三类典型的变化规律,变化趋势与大气温度有明显差异,有必要建立混凝土内部响应温度与大气温度的关系模型,用于耐久性设计和寿命预测。

2) 青岛滨海潮汐区混凝土的干湿比为1:5~5:1。潮汐区不同高度混凝土受海水温度影响时,位置越高其温度变化越滞后,变化周期越短,形成的波峰越陡,但峰值基本相同;在受大气温度影响时,位置越高,其温度变化越提前,变化周期越长,形成的波峰越大,峰值越高。而且潮汐区混凝土内部的温度响应具有明显的季节性特征。冬季,高潮位混凝土内部温度低于低潮位混凝土内部温度。其他季节,高潮位混凝土内部温度高于低潮位混凝土内部温度。水下区混凝土内部温度与海水温度基本一致。

3) 青岛滨海浪溅区混凝土表层0~10 mm范围以内相对湿度基本维持在95%以上,混凝土表面下25 mm及更深处混凝土基本处于饱和状态。水下区、潮汐区混凝土内部也基本上处于饱和状态。所以,在进行室内加速试验的过程中,不建议将混凝土试块烘干。室内外加速试验的相关性至关重要。这是用室内试验结果预测实际暴露试验结果的依据,也是寿命预测精度的关键所在。

4) 上述所得出的结论只适用于青岛滨海环境,不具有通用性,因为对于不同的海域,环境条件具有一定的差异性。

## 基金项目

国家自然科学基金(U1706222);山东省重点研发计划(2019GSF110006);山东省“双一流”建设工程-土木;青岛市应用基础研究计划项目(17-1-1-13-jch)。



## 参考文献

- [1] 侯保荣, 路东柱. 我国腐蚀成本及其防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(6): 601-609.
- [2] 延永东, 金伟良, 王海龙, 等. 干湿交替作用下氯离子在开裂混凝土中的运输规律[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(5): 2060-2067.
- [3] Yin, S., Jing, L., Yin, M., *et al.* (2019) Mechanical Properties of Textile Reinforced Concrete under Chloride Wet-Dry and Freeze-Thaw Cycle Environments. *Cement and Concrete Composites*, **96**, 118-127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.020>
- [4] 姜硕. 干湿循环下混凝土氯离子传输与饱和度研究[D]: [硕士学位论文]. 舟山: 浙江海洋大学, 2018.
- [5] 刘倩, 申向东, 薛慧君, 等. 氯盐侵蚀和干湿循环条件下浮石混凝土的耐久性[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 137-143.
- [6] 徐港, 李运攀, 王谊敏, 等. 干湿交替环境下氯离子在承压混凝土内的传输特性[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(5): 727-732.
- [7] 张奕, 姚昌建, 金伟良. 干湿交替区域混凝土中氯离子分布随高程的变化规律[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(2): 360-365.
- [8] 彭智. 干湿循环与荷载耦合作用下氯离子侵蚀混凝土模型研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [9] 王琴. 干湿循环下桥梁混凝土抗氯离子侵蚀试验分析[J]. 混凝土, 2017(9): 20-22.
- [10] Ghazy, A. and Bassuoni, M.T. (2017) Resistance of Concrete to Different Exposures with Chloride-Based Salts. *Cement and Concrete Research*, **101**, 144-158. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.001>
- [11] Alsaiif, A., Bernal, S.A., Guadagnini, M., *et al.* (2018) Durability of Steel Fibre Reinforced Rubberised Concrete Exposed to Chlorides. *Construction and Building Materials*, **188**, 130-142. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.122>
- [12] 吕健, 余亮, 龙海波, 等. 复杂环境下钢筋混凝土抗盐侵蚀性能[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(12): 23-26.
- [13] Jeedigunta, G.V. (1998) Accelerated Durability Testing of Reinforced and Unreinforced Concretes in a Simulated Marine Environment.
- [14] Kawaai, K., Nishida, T., Saito, A., *et al.* (2019) Corrosion Resistance of Steel Bars in Mortar Mixtures Mixed with Organic Matter, Microbial or Other. *Cement and Concrete Research*, **124**, Article ID: 105822. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105822>
- [15] 袁智强, 庞森, 叶英华, 等. 海水干湿环境下荷载损伤钢筋混凝土梁的氯扩散性[J]. 混凝土, 2017(6): 60-63.
- [16] 沈骏, 袁梦, 闫敏, 等. 海洋环境下干湿循环对结构混凝土性能影响的研究现状、存在问题及其发展趋势[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(6): 1929-1938.
- [17] Tittarelli, F., Mobili, A., Giosue, C., *et al.* (2018) Corrosion Behaviour of Bare and Galvanized Steel in Geopolymer and Ordinary Portland Cement Based Mortars with the Same Strength Class Exposed to Chlorides. *Corrosion Science*, **134**, 64-77.
- [18] Wu, J., Zhang, R., Diao, B., *et al.* (2019) Effects of Pre-Fatigue Damage on High-Cycle Fatigue Behavior and Chloride Permeability of RC Beams. *International Journal of Fatigue*, **122**, 9-18. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.01.002>
- [19] 谭靖, 唐川江, 陈浩, 等. 干湿循环作用对非饱和锂渣混凝土氯离子扩散性能的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 72-77 + 8-9.
- [20] 李永强, 巴明芳, 柳俊哲, 等. 干湿循环作用下水泥基复合材料抗氯离子侵蚀性能及其微观结构变化[J]. 复合材料学报, 2017, 34(12): 2856-2865.
- [21] 刘奇东, 刘荣桂, 姜慧, 等. 海洋干湿交替区混凝土结构的人工气候模拟加速试验设计[J]. 混凝土, 2013(11): 50-52 + 67.
- [22] Zhang, J., Guo, J., Li, D., *et al.* (2017) The Influence of Admixture on Chloride Time-Varying Diffusivity and Micro-structure of Concrete by Low-Field NMR. *Ocean Engineering*, **142**, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.065>
- [23] 李春秋, 李克非. 干湿交替下表层混凝土中氯离子传输: 原理、试验和模拟[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(4): 581-589.
- [24] 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(1): 49-54.
- [25] Chen, F., Gao, J., Qi, B., *et al.* (2017) Degradation Progress of Concrete Subject to Combined Sulfate-Chloride Attack under Drying-Wetting Cycles and Flexural Loading. *Construction and Building Materials*, **151**, 164-171.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.074>

- [26] 黄俊, 张俊芝, 吴灵杰, 等. 干湿循环条件下混凝土氯离子侵蚀的模拟试验及相似性[J]. 混凝土, 2012(12): 4-5 + 8.
- [27] Xu, J., Qi, W., Peng, S, *et al.* (2012) Error of Saturation Vapor Pressure Calculated by Different Formulas and Its Effect on Calculation of Reference Evapotranspiration in High Latitude Cold Region. *Procedia Engineering*, **28**, 43-48.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.680>
- [28] 张鹏. 水泥基材料内部水分运动的可视化成像追踪及其规律研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2010.
- [29] 朱方之, 赵铁军, 王鹏刚, 等. 混凝土毛细吸水影响因素探讨[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2012, 44(5): 627-631.