

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.05.013

# 风速对混凝土内部湿度场分布的影响

孙拴虎

(陕西机电职业技术学院 土木工程学院, 陕西 宝鸡 721001)

**摘要:** 双块式无砟轨道道床板结构在铁路运营早期出现了的裂缝病害较为严重,对结构的耐久性产生了不利影响。为保障道床板结构的服役年限,基于混凝土湿度场展开了相关研究。试验探索了不同风速条件下,混凝土试件内部相对湿度的分布规律,结果表明:风速对混凝土试件内部相对湿度的分布具有较大的影响,其增加了混凝土试件内部水分迁移的速率,距离干燥面不同深度处的水分扩散程度不同,内部湿度呈梯度分布,风速加剧了湿度的分布梯度。且伴随风速的增加混凝土内部相对湿度值降低的开始时间逐渐缩短,且在距干燥面一定范围内的湿度梯度将是最大的。此外,借助 ANSYS 有限元软件模拟分析了混凝土的湿度场,进一步对试验结果进行了验证分析和补充说明。

**关键词:** 混凝土; 风速; 相对湿度; 湿度梯度; 分布规律

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)05—0078—05

## Influence of Wind Speed on the Distribution of Humidity Field Inside Concrete

SUN Shuanhu

(School of Civil Engineering, Shaanxi Institute of Mechatronic Technology, Baoji, Shaanxi 721001, China)

**Abstract:** In the early stage of railway operation, the double-block ballast less track slab structure appeared many crack diseases, which had negative impact on the durability of the structure. In order to ensure the service life of the ballast slab structure, relevant research was carried out based on the concrete humidity field. The distribution law of relative humidity in concrete specimens under different wind speeds is explored. The results show that wind speed has a great influence on the distribution of relative humidity in concrete specimens. It increases the rate of water transport in concrete specimens. The degree of moisture diffusion is different at different depths from the drying surface. The internal humidity presents a linear distribution trend, and the wind speed could increase this trend. In addition, with the increase of wind speed, the beginning time of the decrease of relative humidity in concrete is shortened gradually, and the humidity gradient will be the largest value in a certain range from the drying surface. Furthermore, the moisture field of concrete is simulated and analyzed by the finite element software ANSYS, and the test results are further verified and supplemented.

**Keywords:** concrete; wind speed; relative humidity; humidity gradient; distribution law

双块式无砟轨道道床板在我国西北大部分地区,因受其当地气候干燥寒冷、昼夜温差较大、日照强烈且日照时间长,以及紫外线照射十分强烈等环境因素的影响,出现了较多的裂缝病害<sup>[1-2]</sup>。国内学者的调查研究资料表明,结构物在工程实际中的裂缝 80% 都是因温、湿度和不均匀沉降等变形作用而引起,其中湿度变化是引起结构物产生裂缝最

为常见的病因<sup>[3]</sup>。结构因湿度变化将产生一定的收缩变形,在受到约束作用后必然产生拉应力,一旦该应力超过了材料的抗拉强度,必然引起结构出现开裂现象<sup>[4]</sup>。混凝土内部相对湿度变化是湿度变形发生的内在驱动力,主要原因是周围环境条件和水泥水化作用等的影响将导致混凝土结构内部的水分含量发生一定变化,进而引起结构物的体积发生

变化。混凝土本身属多孔复合材料,具有干缩湿胀的特性<sup>[5]</sup>,其内部的水分含量通常采用相对湿度值来表征。

张登祥等<sup>[6]</sup>采用数字式温湿度传感器测量了在早龄期密封状态下混凝土试件内部相对湿度的变化规律,并总结出了混凝土强度对内部相对湿度变化的影响规律,指出水灰比越低的混凝土结构其内部湿度下降速度更快且较容易产生裂缝。侯景鹏等<sup>[7]</sup>研究并建立的混凝土内部相对湿度与干缩的相关关系,对改善混凝土结构的收缩变形以及控制混凝土开裂等问题均具有实际意义。周继凯等<sup>[8]</sup>研究表明,混凝土内部的相对湿度是呈梯度分布的。当结构尺寸较大时,因其不同部位的水分扩散程度不同,湿度梯度将会引起混凝土在内部产生收缩应力,一旦该应力超过一定限值,将导致混凝土结构产生开裂现象,最终影响结构的使用寿命。在恒温恒湿环境条件下,常洪雷<sup>[9]</sup>研究指出,混凝土试件内部湿度的衰减速度先快后慢。高原等<sup>[10]</sup>研究得出了环境湿度、骨料含量和水泥用量、水灰比等对混凝土试件内部湿度分布的影响,并总结出了内部相对湿度在超早龄期的分布规律及发展变化。在等温干燥条件下,蒋正武等<sup>[11]</sup>研究了水灰比对混凝土内部相对湿度分布的影响规律,以及不同龄期的混凝土试件在距离干燥面分别为3 cm、11 cm和21 cm处的内部相对湿度分布情况,研究表明混凝土的内部相对湿度变化主要受内部水分扩散的影响。王卫仑等<sup>[12]</sup>通过一系列试验建立并验证了内部相对湿度响应谱模型和自然环境湿度变化谱。在人工气候环境下,蒋建华等<sup>[13]</sup>通过混凝土内部相对湿度正向和反向响应试验,研究建立了人工气候环境条件下混凝土内部相对湿度的响应预测模型。

上述研究均是在恒温恒湿的试验条件下进行的,其研究对象与服役于西北地区特殊环境条件下的混凝土结构性能偏差较大。外加,有关风速对混凝土内部相对湿度及收缩性能影响的研究偏少。鉴于此,针对西北地区的特殊环境条件并主要基于风速开展了混凝土内部相对湿度的测试试验,借助ANSYS有限元软件模拟分析了混凝土试件的湿度场,对试验结果进行了验证补充。

## 1 试验概况

### 1.1 试验方案

试验制备的“湿度试件”尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,将其中100 mm×400 mm的一个面预

留为干燥面不做处理,剩余面均用液体石蜡和透明胶布包裹进行密封处理。试件制作时在距干燥面分别为30 mm、45 mm和60 mm的不同深度位置处置入SHT21温湿度传感器(见图1)。湿度试件在制备过程中将湿度传感器埋置在设计位置见图2。试验过程中,通过改变试件与风扇之间的相对距离,使各试验组风速控制在0 m/s、1 m/s、2 m/s、3 m/s。



图1 温湿度传感器及保护壳

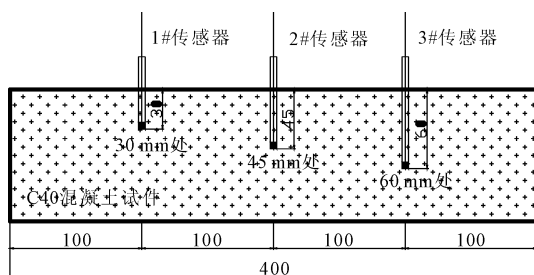


图2 温湿度传感器相对位置图(单位:mm)

### 1.2 试验结果分析

按照上述的试验步骤,对风速组试件不同深度处的内部相对湿度进行了前30 d龄期的试验观测,观测结果见图3—图6。

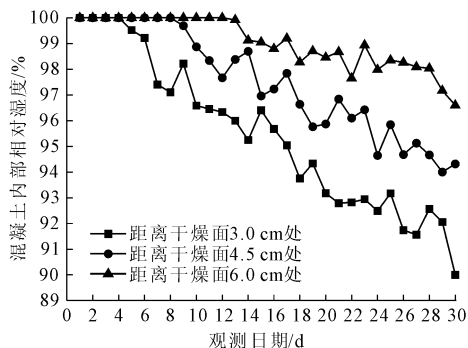


图3 0 m/s条件下不同深度处的湿度分布

由风速试验组的湿度分布图可看出,距混凝土试件干燥面不同位置处的试件内部相对湿度的开始降低的时间和降低的幅度均不相同<sup>[14]</sup>。具体表现为:

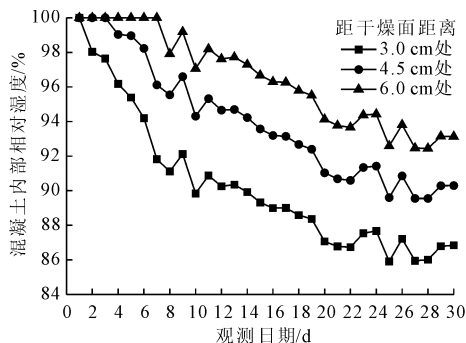


图 4 1 m/s 条件下不同深度处的湿度分布

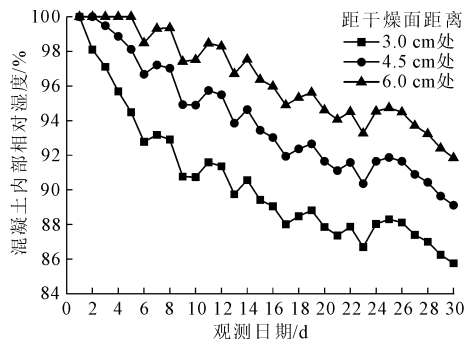


图 5 2 m/s 条件下不同深度处的湿度分布

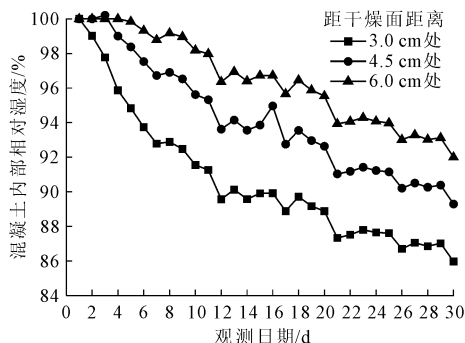


图 6 3 m/s 条件下不同深度处的湿度分布

(1) 在 1 m/s 的条件下,距离干燥面 3.0 cm 处、4.5 cm 处和 6.0 cm 处的湿度值分别在干燥 1 d、3 d 和 7 d 后开始下降。

(2) 在 2 m/s 条件下,距离干燥面 3.0 cm 处、4.5 cm 处和 6.0 cm 处的湿度值分别在干燥 1 d、2 d 和 5 d 后开始下降。

(3) 在 3 m/s 条件下,距离干燥面 3.0 cm 处、4.5 cm 处和 6.0 cm 处的湿度值分别在干燥 1 d、2 d 和 4 d 后开始下降。

(4) 风速为 1 m/s 条件下,试件在干燥 14 d 后距离干燥面 3.0 cm 处、4.5 cm 处和 6.0 cm 处的湿度值分别降低至 90.57%、94.63% 和 97.53%; 风速为 2 m/s 条件下,试件在干燥 14 d 后距离干燥面 3.0 cm 处、4.5 cm 处和 6.0 cm 处的湿度值分别降

低至 89.92%、94.23% 和 97.29%; 风速为 3 m/s 条件下,试件在干燥 14 d 后距离干燥面 3.0 cm 处、4.5 cm 处和 6.0 cm 处的湿度值分别降低至 89.58%、93.56% 和 96.40%。

(5) 风速为 1 m/s 条件下,试件在干燥 30 d 后距离干燥面 3.0 cm 处、4.5 cm 处和 6.0 cm 处的湿度值分别降低至 86.85%、90.30% 和 93.13%; 风速为 2 m/s 条件下,试件在干燥 30 d 后距离干燥面 3.0 cm 处、4.5 cm 处和 6.0 cm 处的湿度值分别降低至 85.97%、89.29% 和 92.0%; 风速为 3 m/s 条件下,试件在干燥 30 d 后距离干燥面 3.0 cm 处、4.5 cm 处和 6.0 cm 处的湿度值分别降低至 85.76%、89.11% 和 91.85%。

上述分析可以得出,风速明显改变了混凝土试件内部水分蒸发的速率,伴随风速的增大混凝土试件内部相对湿度值的降低开始时间逐渐缩短,且距离干燥面越近其湿度变化的速度越快,越往混凝土试件内部其湿度扩散的速度越为缓慢。此外,明显从湿度分布图中可以得到试件在距干燥面 3.0 cm 到 4.5 cm 范围内的湿度梯度远大于试件距干燥面 4.5 cm 到 6.0 cm 范围内的湿度梯度,由此不难发现,在距干燥面一定范围内的试件湿度梯度将是最大的,越往试件内部则其湿度梯度将逐渐变小。

## 2 数值模拟

随着混凝土内部水分的迁移,结构内部出现了明显的湿度梯度,不同位置有着不同的湿度值,需引入湿度场。在试验研究所得试验数据是针对单个点的湿度变化,反映不出内部截面上的湿度扩散过程,为此,采用有限元软件 ANSYS 来模拟分析风速条件下混凝土试件的整体湿度场,对试验进行补充。在计算湿度场时,湿度扩散系数  $D$  和表面因子  $f$  是求解湿度场的两个最重要的参数。

其中,湿度扩散系数  $D$  可根据湿度扩散方程计算求得,见式(1)。

$$D(H) = D_{\text{sat}} \left\{ \alpha_0 + \frac{1 - \alpha_0}{1 + [(1 - H)/(1 - H_c)^n]} \right\} \quad (1)$$

式中: $H$  代表混凝土内部的相对湿度,%;  $D_{\text{sat}}$  可通过室内试验反演求得,是指在饱和状态下混凝土的湿度扩散系数;  $\alpha_0 = \frac{D_0}{D_{\text{sat}}}$ ,  $D_0$  是指在相对湿度为 0 时的混凝土湿度扩散系数;  $n$  为回归系数,一般在 6 ~ 16 之间取值,表征湿度扩散系数的下降速率;  $H_c$  为  $D(H) = (\frac{D_{\text{sat}} - D_0}{2})$  时所对应的湿度值,一般取值在 0.75 ~ 0.80 之间。根据文献[15] 研究提出的在

单面干燥和六面干燥条件下,饱和状态的水灰比与湿度扩散系数  $D_{sat}$  有关的表达式(见式(2)),求得本试验中  $D_{sat} = 2.46 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$ 。其余参数则参照 CEB-90 中的相关规定分别取  $\alpha_0 = 0.05$ ;  $n = 15$ ;  $H_c = 0.75$ 。

$$D_{sat} = \frac{\frac{230}{w/c} + 0.25w/c - 14.7}{240} \quad (2)$$

表面因子  $f$  影响着混凝土内部水分往空气中传递的速率。袁勇<sup>[16]</sup> 基于风速的考虑改进了该表达式,见式(3)。

$$f(H, H_c) = A(0.253 + 0.06v) \quad (3)$$

式中: $A$  为经验系数; $v$  指外界的平均风速。通常,表面因子  $f$  是通过试算法来确定,考虑到本试验是在人工试验室中进行的且水灰比保持不变,可将表面因子  $f$  取为常数<sup>[14]</sup>。按照试验风速分别选取  $f_1 = 3.0962 \times 10^{-4} \text{ m/h}$ ,  $f_2 = 6.1922 \times 10^{-4} \text{ m/h}$ ,  $f_3 = 9.2882 \times 10^{-4} \text{ m/h}$  进行数值模拟分析,如图 7 所示。提取有限元软件中的分析结果,得出 1 d、3 d、7 d、14 d、21 d 和 28 d 龄期在不同风速条件下试件的湿度场分布情况如图 8—图 10 所示。此外,以 0 m/s 条件下距干燥面 4.5 cm 处的湿度场分布为例,绘制其模拟结果与试验结果的对照图,见图 11。

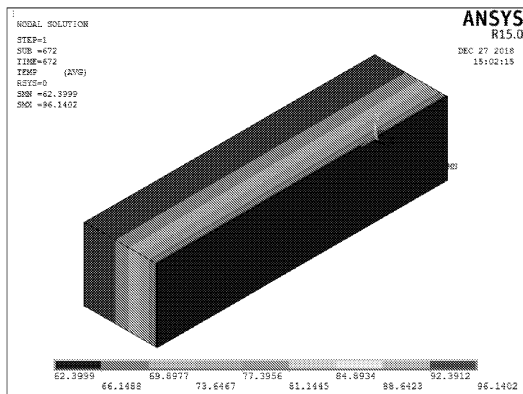


图 7 有限元模拟湿度场分布

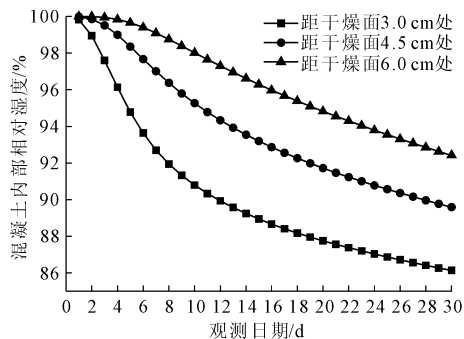


图 8 1 m/s 条件下试件各龄期内部湿度场分布

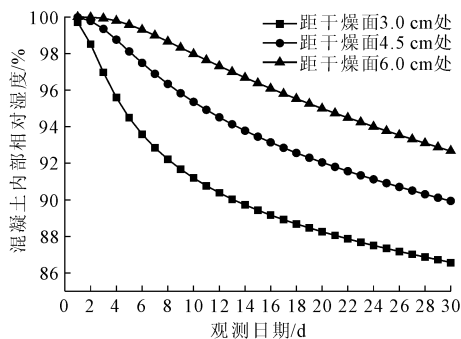


图 9 2 m/s 条件下试件各龄期内部湿度场分布

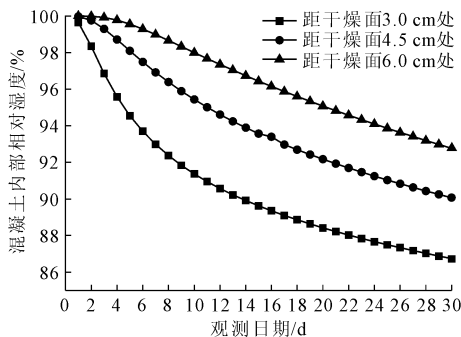


图 10 3.0 m/s 条件下试件各龄期内部湿度场分布

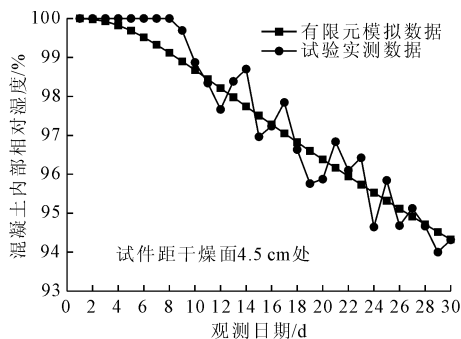


图 11 4.5 cm 处湿度场分布对照图

根据风速组湿度试件各龄期内部湿度场分布情况可以得出以下结论<sup>[14]</sup>：

(1) 风速为 1 m/s 条件下,试件在干燥 3 d 后距离干燥面 3.0 cm 处、4.5 cm 处和 6.0 cm 处的湿度值分别降低至 97.597%、99.515% 和 99.948%。风速为 2 m/s 条件下,试件在干燥 3 d 后距离干燥面 3.0 cm 处、4.5 cm 处和 6.0 cm 处的湿度值分别降低至 96.968%、99.348% 和 99.926%。风速为 3 m/s 条件下,试件在干燥 3 d 后距离干燥面 3.0 cm 处、4.5 cm 处和 6.0 cm 处的湿度值分别降低至 96.854%、99.295% 和 99.917%,这一结论与混凝土试件试验所得的结果基本吻合。

(2) 混凝土试件内部相对湿度的下降速度和下降幅度明显伴随着风速的增加而逐渐加大,且水分扩散始于干燥面并逐渐向试件的内部发展。以干燥

3 d 后的混凝土试件为例,在风速分别为 1 m/s、2 m/s 和 3 m/s 的条件下,试件湿度值开始降低的位置分别是距离干燥面 8.5 cm 处、9.0 cm 处和 9.5 cm 处。由此不难总结出,风速加快了混凝土试件内部水分的蒸发,影响着试件内部相对湿度的分布。

(3) 距离试件干燥面为 4.5 cm 处的混凝土内部相对湿度的模拟值和实测值的分布曲线趋势几乎一致,在数值上有 1.5% 左右的偏差。ANSYS 有限元模拟分析结果和试验实测结果相互验证和补充,表明该试验所得关于混凝土试件内部湿度场分布的结论是科学合理的。

### 3 结 论

风速明显加快了混凝土试件内部的水分扩散速度,极大地影响着混凝土内部相对湿度的分布。内部相对湿度值在距混凝土试件干燥面不同深度处降低的幅度及变化开始的时间均不相同。靠近干燥面位置处的混凝土内部水分最容易扩散,距干燥面越远处的试件内部水分因扩散路径变长故扩散较难,湿度交换的速率也将越为缓慢。伴随着风速的增加,混凝土内部水分扩散从干燥面逐渐向试件的内部发展,内部相对湿度的下降幅度和下降速度将明显加大,后期干燥面与外界环境发生水分交换的速率将逐渐减缓,即使再增加风速,试件内部湿度分布情况将趋于平稳。且在距干燥面一定范围内的试件湿度梯度将是最大的,越往试件内部则其湿度梯度将逐渐变小<sup>[14]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 孙拴虎,唐先习,何勇,等. 基于寒旱地区冲击回波法混凝土无损检测的试验研究[J]. 混凝土,2018(8): 22-26.
- [2] 胡少伟,韦 华,范 冰. 旱区寒区水工混凝土材料耐

久性及其损伤断裂性能研究进展[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(2):1-11.

- [3] 王铁梦. 工程结构裂缝控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997:20-25.
- [4] 朱 超. 基于混凝土干缩试验及数值模拟的现浇楼板裂缝控制研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.
- [5] 侯明扬,孙志勇,李梦希,等. 桥梁用 C60 高性能补偿收缩混凝土性能研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(4):57-61.
- [6] 张登祥,杨伟军. 混凝土早期约束收缩开裂机理及试验研究[J]. 铁道学报,2011,33(2):101-106.
- [7] 侯景鹏,袁 勇. 埋入式数字传感器测量混凝土相对湿度新方法[J]. 混凝土,2008(9):123-125.
- [8] 周继凯,慕建磊,严媛媛,等. 早龄期混凝土内部湿度场的测量与数值模拟[J]. 科学技术与工程,2013,13(15):4252-4256.
- [9] 常洪雷. 环境作用下混凝土内部相对湿度与宏观性能演变研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2013.
- [10] 高 原,张 君,韩宇栋. 混凝土超早期收缩试验与模拟[J]. 硅酸盐学报,2012,40(8):1088-1094.
- [11] 蒋正武,王培铭. 等温干燥条件下混凝土内部相对湿度的分布[J]. 武汉理工大学学报,2003(7):18-21.
- [12] 王卫仑,刘 鹏,邢 锋. 自然环境湿度变化与混凝土内湿度响应[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(12):5109-5116.
- [13] 蒋建华,袁迎曙,王嵩林,等. 人工气候环境下混凝土内相对湿度响应预测[J]. 中南大学学报(自然科学版),2013,44(12):5091-5099.
- [14] 孙拴虎. 铁路整体道床混凝土干缩特性及开裂防治研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2019.
- [15] 王永宝,贾 毅,赵人达. 基于 ANSYS 的混凝土内湿度场计算方法[J]. 西南交通大学学报,2017,52(1): 54-60.
- [16] 袁 勇. 混凝土结构早期裂缝控制[M]. 北京:科学出版社,2004:10-18.