

早龄期混凝土内部湿度场的测量与数值模拟

周继凯 慕建磊 严媛媛 潘 杨

(河海大学土木与交通学院,南京 210098)

摘要 通过对以往常用的混凝土内部相对湿度测试方法进行比较分析,研究开发能够准确、方便、数字化测试水泥基材料内部相对湿度的新型测试装置。基于新型测试装置对早龄期混凝土内部相对湿度进行了测量;并对混凝土内部湿度场进行了数值模拟。结果表明:新型测试装置结果要比预埋管法准确,装置的滞后性小;混凝土表面相对湿度降低较快,内部降低慢,水分含量沿试件高度分布不均,存在明显的湿度梯度;低水胶比混凝土的内部湿度场不仅受水分扩散的影响,还受到自干燥效应的影响;有限元数值模拟的计算结果与实测值有良好的 consistency,有限元仿真计算能够较准确模拟混凝土的相对湿度,可用于分析不同构件混凝土的相对湿度变化规律。

关键词 早龄期混凝土 内部相对湿度 湿度传感器 探头 低水胶比 数值模拟

中图分类号 TU528 O64; **文献标志码** A

混凝土中的非均匀湿度分布会形成湿度梯度,从而引起不同的干缩变性,使结构的表面产生拉应力并可能导致裂缝。这种现象会严重影响混凝土结构的使用功能及耐久性能。混凝土中湿度场的确定是干缩应力计算的前提,而且混凝土内部湿度变化对混凝土早期热膨胀系数也有显著的影响^[1]。

测量混凝土内部相对湿度(Relative Humidity, RH)通常采用湿度传感器,但测试相对比较困难,并且由于传感器技术的原因,混凝土内部湿度的测量一直是公认的难题。不同研究者在测量混凝土内部湿度时常遇到各种问题而影响测量结果的准确性。目前相关试验中所采用的混凝土试件大多是成熟混凝土(龄期大于28 d),然而大量工程实践表明,现代混凝土结构开裂大多发生在早期^[2],因此研究早龄期混凝土内部相对湿度的变化对于监控混凝土结构开裂状况有着重要意义。

与混凝土的温度场相比,湿度场的数值模拟要困难许多。其原因除了数学模型具有非线性以外,

更主要的是计算参数的不易确定性,如湿度扩散系数就随着内部湿度的变化而变化^[3]。

现对以往常用的混凝土内部相对湿度测试方法进行比较分析,研究开发能够准确、方便、数字化测试水泥基材料内部相对湿度的新型测试装置,基于新型测试装置对早龄期混凝土内部相对湿度进行了测量。并通过合理的选择计算参数,对混凝土内部湿度场进行了数值模拟,这对于进一步研究混凝土的收缩变形特性,进而计算收缩引起的应力具有重要意义。

1 混凝土内部相对湿度测量方法

1.1 常见相对湿度测试方法的比较分析

对于相对湿度的测量方法的技术要求有:精度高,长期稳定性,低滞后性,响应时间短,温度补偿良好,量程范围大。常见的混凝土内部相对湿度的测试方法多为预埋管法,测试结果难以满足上述要求。而且,大多数测试方法只能用于测量成熟期混凝土的相对湿度,不能从混凝土浇筑起始就开始测量;测湿的密封空间较大,易受到外界湿度与温度的影响,使得测试空间内水蒸气含量受到影响,降低测试结果的精确性,且具有较大的滞后性;测湿元件容易受到化学蒸汽的侵蚀,影响测试元件的长期稳定性,不适合用于现场大批测点同时监测。相

2013年1月24日收到,3月5日修改 国家自然科学基金项目
(51178162、51009058、50979032)、江苏省“六大

人才高峰”计划(07-F-012)资助

第一作者简介:周继凯(1970—),男,教授,博士。研究方向:混凝土结构基本理论及其工程应用。E-mail:zhoujikai@163.com。

表 1 内部相对湿度测试所用混凝土试件的配合比

水泥 /(kg·m ⁻³)	水 /(kg·m ⁻³)	砂 /(kg·m ⁻³)	石子 /(kg·m ⁻³)	粉煤灰 /(kg·m ⁻³)	磨细矿渣 /(kg·m ⁻³)	膨胀剂 /(kg·m ⁻³)	减水剂 /(kg·m ⁻³)
415	155	650	1 100	30	40	10	7.5

对湿度对温度具有依赖性,湿度测量时需要进行温度补偿。

从以上分析可以看出,现有混凝土内部测量方法在一定程度上存在着测量精度低、测量速度慢、效率低、难于应用于现场监测等缺点,有必要开发新的混凝土内部相对湿度的测量方法。

1.2 新型相对湿度测试装置

介绍一种埋置式水泥基材料内部相对湿度测量装置及其测试方法,该装置不仅能够测量成熟混凝土的内部相对湿度,还适用于早龄期混凝土。测试装置详情可参见专利^[4],测量范围为 0 ~ 100% RH,温度测量范围为(-40 ~ +123.8)℃;响应时间为 <8 s;能够自行温度补偿,体积小等特点,探头制作完毕放置一段时间后即可使用。相对湿度测试时可将探头直接埋置于水泥基材料中,测量前将传感器接入数据采集系统下位机(模块),再通过串行接口(485 转换器)接入计算机,即可测量水化过程中的相对湿度数据。

2 基于新型测试装置研究混凝土内部相对湿度

利用新型测湿装置及其测试方法和传统测湿方法(预埋管法)测量混凝土相对湿度,分析新型测试装置的性能和早龄期混凝土内部相对湿度变化规律。

试验采用的混凝土试件尺寸为:15 cm × 15 cm × 15 cm。混凝土配合比见表 1,水灰比为 0.37,水胶比为 0.32,混凝土强度等级为 C50。参与试验的试件为 A 试件和 B 试件 2 个,其中 A 试件沿高度方向布置 3 支新型测湿探头,编号为 1 号、2 号、3 号,探头距表面深度依次为 0.5 cm,9 cm,12 cm。B 试件采用传统预埋管法测试湿度(测湿探头为 DB170),传感器编号为 4 号,测湿位置为距表面 7.5 cm。A 试件的测湿探头在混凝土浇筑前固定于测试位置,混凝土浇筑完毕即可开始测量;B 试件待混

凝土终凝后,将管底水泥浆清理出,再插入测湿探头开始测量数据,2 个试件带模养护 24 h 后拆模。试件上表面作为干燥面,其余 5 个面进行密封,以确保在干燥过程中湿度单向扩散,密封方法是:先用凡士林涂抹于表面,再用塑料薄膜包裹严实,见图 1。

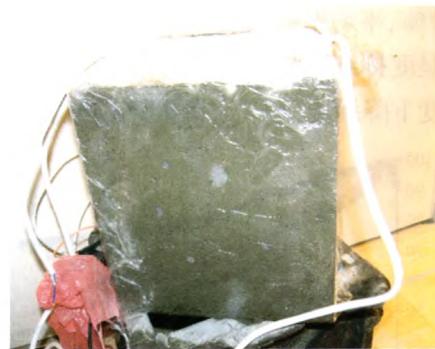


图 1 用于内部相对湿度测试的混凝土试件

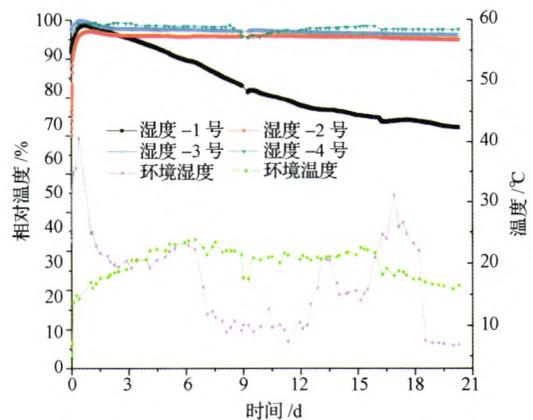


图 2 混凝土试件内部相对湿度与试件关系

该装置进行了早龄期 21 d 的内部湿度的测量,测量结果如图 2 所示。从测量结果可以看出:

1) 4 号曲线为采用预埋管法测试的数据,曲线波动较大,说明测量结果受外界环境影响较大;而新型测试装置的测试结果显示其曲线是平滑走势,受外界影响较小。对比可以看出该测湿方法所得到的结果要比预埋管法准确,测试结果受外界环境

影响较小。且新型测湿装置的滞后性小,在试件浇筑后,很快达到混凝土内部真实湿度;

2)图2中1—3号曲线为混凝土内部不同高度处的相对湿度随龄期的变化规律。从图2中可以看出,由于混凝土中水泥的水化反应和干燥面水分向空气中扩散,使得混凝土内部水分减少,导致相对湿度(RH)随龄期增长逐渐降低。而且不同位置湿度的下降幅度与规律明显不同,即存在湿度梯度。其他研究者的试验结果表明,湿度梯度对于低水灰比的高强度混凝土更为突出^[5]。在环境湿度为(40±5)%,平均温度为22℃的环境下,混凝土表面相对湿度持续下降,21d下降至72.4%,而内部相对湿度下降缓慢,21d下降至95.3%。

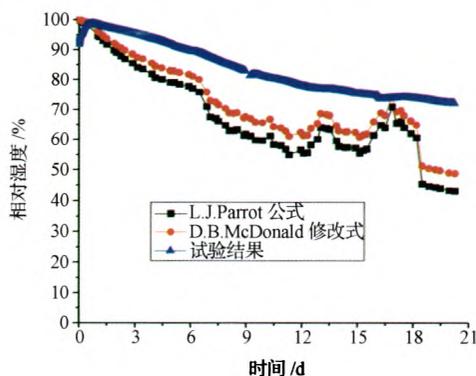


图3 混凝土内部湿度预测与试验结果的比较

L. J. Parrot^[6](1988)提出了式(1)来预测室温情况下混凝土单面干燥时内部相对湿度的变化

$$\begin{cases} rh = rha + (100 - rha)f(t) \\ f(t) = 1/(1 + t/b) \\ b = d^X(Y - e)(w - Z)/W \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中:rh为预测的内部相对湿度值(%);rha为环境相对湿度(%);t为龄期(d);d为距离干燥表面的深度(mm);e为粉煤灰(PFA)或高炉矿渣(GBFS)替代的普通硅酸盐水泥的组分(%);w为水胶比。W, X, Y与Z为常数,L. J. Parrot认为其值分别为W = 8, X = 1.35, Y = 70与Z = 0.19。而D. B. McDonald^[7]则认为W = 11.4, X = 1.35, Y = 128.00与Z = 0.03。

L. J. Parrot^[8](1991)对成熟混凝土试件进行了龄期最长为(2g)时的内部相对湿度的测量,发现

混凝土内部相对湿度与时间的变化关系呈双线性。计算公式如下式(2)所示:

$$f(t) = e^{-kt} \quad (2)$$

式(2)中:k = 0.8 - 0.14T + 0.01T², T = t/t_{1/2}。t_{1/2}是反映距离干燥表面的深度与龄期的关系,其计算公式见下。

$$t_{1/2} = 10jd; \quad t_{1/2} < 414d \quad (3)$$

$$t_{1/2} = 3jd + 290; \quad t_{1/2} \geq 414d \quad (4)$$

式中:对于普通硅酸盐水泥(OPC)混凝土,粉煤灰(PFA)混凝土与高炉矿渣(GGBS)混凝土来说,j的取值分别为1.00,0.56与0.53。

由于本文针对的是早龄期混凝土内部湿度场的测量,而式(2)是针对成熟混凝土,故选择式(1)进行计算混凝土内部相对湿度。将式(1)的计算结果与距表面5mm处的内部湿度的试验结果进行比较,比较结果如图3所示,发现无论是原式或是修改式的计算结果均与试验测得的结果有较大的偏差,式(1)并不适用于低水胶比的水泥基材料,这与Z. Jiang^[9]由内部湿度测试结果得到的结论是一致的。预测值与测量值的偏差主要来源于以下几个方面。正如L. J. Parrot^[6]自己所指出的,式(1)只适用于高水胶比(>0.4)的水泥基材料,并未考虑自干燥效应对水泥基材料内部湿度场变化的影响。从图3可以看出,内部相对湿度的预测值要低于测量结果。对于低水胶比的水泥基材料来说,自干燥效应对早期湿度场变化的影响要高于高水胶比材料,且低水胶比混凝土的微观结构较为致密,水分扩散导致湿度的降低要低于高水胶比混凝土^[10]。综合自干燥与水分扩散对早龄期混凝土内部湿度场变化的影响,可以发现,在相同的干燥条件下,低水胶比混凝土内部湿度的下降要小于高水胶比混凝土。

3 早龄期混凝土内部湿度场的数值模拟

3.1 计算参数的选取

3.1.1 湿度扩散系数D

水泥基材料的湿度扩散系数与其内部的湿度、温度以及水泥水化程度等多种因素有密切的关系,尤其与湿度之间存在着很强的非线性关系^[11,12]。Z. P. Bazant^[12]提出用下式(5)来计算湿度扩散

系数:

$$\frac{D}{D_{sat}} = a_0 + \frac{1 - a_0}{1 + \left(\frac{100 - rh}{100 - rha}\right)} \quad (5)$$

式(5)中: D_{sat} 为饱和状态下混凝土的湿度扩散系数,可由公式 $D_{sat} = \frac{D_{l,0}}{f_{ck}/f_{ck0}}$ 估算,取 $D_{l,0} = 3.6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{h}$; $f_{ck0} = 10 \text{ MPa}$;混凝土抗压强度 f_{ck} 可由等效抗压强度 f_{cm} 来估算,这里取 $f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa}$; a_0, n 为经验系数,由实验数据确定,若无试验条件, Kim J. K. [10] 建议 $\alpha = 0.05, n = 6$ 。

3.1.2 表面水分交换系数 f

表面水分交换系数 f 与混凝土水灰比、内表湿度差、温度、风速等因素相关,特别是风速和水灰比对表面水分交换系数具有重要影响[3]。

Akita H. [13] 提出了不同水灰比砂浆(水灰比 0.3—1.0)的 f 值,并给出了拟合公式:

$$f = \frac{50}{w/c + 10} + 2.5 \quad (6)$$

式(6)中: f 的单位为 cm/day ; w/c 为用百分数表示的水灰比。

Yuan Y. [14] 采用改进的 Menzel 方程来考虑风速的影响:

$$f = A(0.253 + 0.06v_a)(rh - rha) \quad (7)$$

式(7)中: A 为经验系数; v_a 为平均风速(m/s)。

试验是在室内,风速为 $0 \text{ m}/\text{s}$ 。故进行湿度场仿真计算时表面水分交换系数取 $2.2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{h}$ 。

3.2 计算结果及分析

数值模拟分析利用大型商用有限元软件 ANSYS 进行。由于水分在混凝土表面散失较快,表面温度变化较大,因此在有限元建模时应对于干燥面即上表面单元划分细一些。计算得到的第 21 d 混凝土内部相对湿度分布的结果如图 4 所示,由图 4 可以看出有限元计算的湿度分布与实际情况符合,立方体试件是单面干燥,相对湿度成呈带状分布。试验中的实际测湿点的计算结果如图 5 所示,可以看出计算结果与实测值变化趋势一致。且在第 21 d 时表面与内部相对湿度计算结果与实测结果相当,21 d 时表面实测相对湿度为 72.4%,计算值为 71.6%,相对误差 0.7%。计算结果说明通过合理

的选择计算参数,有限元仿真计算能够较准确模拟混凝土的内部相对湿度的变化,可用于分析不同构件混凝土的相对湿度变化规律。

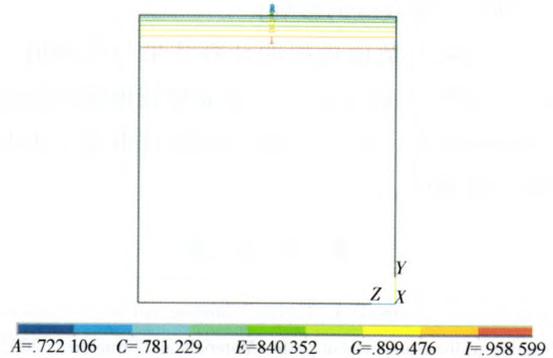


图4 第21天混凝土内部相对湿度分布

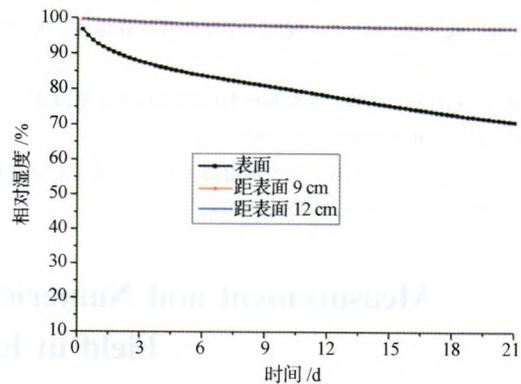


图5 有限元计算得到的实际测湿点的相对湿度历时曲线

4 结论

本文开发出一种埋置式水泥基材料内部相对湿度测量装置及其测试方法,并基于新型测湿装置研究了早龄期混凝土内部湿度场的变化规律,最后结合 ANSYS 软件对早龄期混凝土内部湿度场进行了数值模拟。通过试验与数值模拟,得到了以下结论:

1) 研究开发了一种适用于测量水泥基材料各龄期相对湿度的埋置式测试装置及其测试方法。通过试验对比分析可知该装置具有体积小、测试精度高、滞后性低、响应时间短、受外界环境干扰小,并可直接埋置于被测材料中等特点,可用于测试刚浇筑水泥基材料的相对湿度,具有较好的稳定性;

2) 混凝土内部相对湿度的测量结果表明混凝

土表面相对湿度降低较快,内部降低慢,水分含量沿试件高度分布不均,存在明显的湿度梯度;低水胶比混凝土的内部湿度场不仅受水分扩散的影响,还受到自干燥效应的影响;

3)有限元数值模拟的计算结果与实测值有良好的-致性,有限元仿真计算能够较准确模拟混凝土的相对湿度,可用于分析不同构件混凝土的相对湿度变化规律。

参 考 文 献

- 1 Grasley Z C, Lange D A. Thermal dialation and internal relative humidity of hardened cement paste. *Materials and Structures*, 2007; 40 (3): 311—317
- 2 Bentz D P. A review of early-age properties of cement-based materials . *Cement and Concrete Research*, 2008; 38(2): 196—204
- 3 王 建,戴会超,顾冲时. 混凝土湿度运移计算综述. *水力发电学报*, 2005; 24(2): 85—89
- 4 周继凯,陆建民,张建. 水泥基材料内部相对湿度测试装置及其测试方法, *GBCN101603937*, 2009—12—16
- 5 蒋正武,孙振平,王培铭. 高性能混凝土自身相对湿度变化的研究. *硅酸盐学报*, 2003; 31(8): 770—779
- 6 Parrott L J. Moisture profiles in drying concrete. *Advanced Cement Research*,1988;1(3): 164—170
- 7 McDonld D B, Roper H. Discussion on the paperfactors influencing relative humidity in concrete. *Magazine of Concrete Research*, 1991; 43: 305—307
- 8 Parrott L J. Factors influencing relative humidity in concrete. *Magazine of Concrete Research*,1991;43: 45—52
- 9 Jiang Z, Sun Z, Wang P. Internal relative humidity distribution in high-performance cement paste due to moisture diffusion and self-desiccation. *Cement and Concrete Research*, 2006; 36(2): 320—325
- 10 Kim J K, Lee C S. Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages. *Cement and Concrete Reasearch*, 1999; 29(12): 1921—1927
- 11 张 鹏,赵铁军, Wittmann F. H. ,等. 基于反向分析计算水泥基体的湿扩散系数. *水利学报*, 2010; 41(1): 55—67
- 12 Bazant Z P. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Materials and Structures*, 1972; 5(1): 3—20
- 13 Akita H, Fujiwara T, Ozaka Y. A practical procedure for the analysis of moisture tansfer within concrete due to drying. *Magazine of Concrete Research*,1997;49(3): 129—137
- 14 Yuan Y, Wan Z L. Prediction of cracking within early-age concrete due to thermal, drying shrinkage and creep behavior. *Cement and Concrete Research*, 2002; 32(7): 1053—1

Measurement and Numerical Simulation of Internal Humidity Field in Early-age Concrete

ZHOU Ji-kai, MU Jian-lei, YAN Yuan-yuan, PAN Yang

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

[Abstract] By comparing and analyzing the commonly used test methods of internal relative humidity of concrete, a new type measuring device was developed, which could measure the internal relative humidity of cement-based materials accurately, easily and digitally. The internal relative humidity in early-age concrete was measured based on the new type measuring device, and the internal humidity field was simulated. Results show that the result measured by the new type measuring device, which has small lag, is more accurate than that measured by the preset pipe method. The superficial relative humidity decreases more rapidly than the internal relative humidity does, and the water content distributes unevenly along the specimen height, resulting in obvious humidity gradient; the internal humidity field of low water binder concrete is influenced both by moisture diffusion and by self-desiccation effect; the results of finite element numerical simulation and the measured values are in good agreement, finite element analysis can simulate the relative humidity in concrete accurately and be used to analyze variation of relative humidity in concrete of different components.

[Key words] early-age concrete internal relative humidity humidity sensor probe low water-binder ratio numerical simulation

作者: 周继凯, 慕建磊, 严媛媛, 潘杨, ZHOU Ji-kai, MU Jian-lei, YAN Yuan-yuan, PAN Yang
作者单位: 河海大学土木与交通学院, 南京, 210098
刊名: 科学技术与工程 **ISTIC**
英文刊名: Science Technology and Engineering
年, 卷(期): 2013, 13(15)

参考文献(14条)

1. [Grasley Z C;Lange D A Thermal dialation and internal relative humidity of hardened cement paste](#)[外文期刊] 2007(03)
2. [Bentz D P A review of early-age properties of cement-based materials](#)[外文期刊] 2008(02)
3. 王建;戴会超;顾冲时 [混凝土湿度运移计算综述](#)[期刊论文]-[水力发电学报](#) 2005(02)
4. 周继凯;陆建民;张建 [水泥基材料内部相对湿度测试装置及其测试方法](#) 2009
5. 蒋正武;孙振平;王培铭 [高性能混凝土自身相对湿度变化的研究](#)[期刊论文]-[硅酸盐学报](#) 2003(08)
6. [Parrott L J Moisture profiles in drying concrete](#) 1988(03)
7. [McDonld D B;Roper H Discussion on the paperfactors influencing relative humidity in concrete](#) 1991
8. [Parrott L J Factors influencing relative humidity in concrete](#) 1991
9. [Jiang Z;Sun Z;Wang P Internal relative humidity disribution in high-performance cement paste due to moisture diffusion and self-desiccation](#)[外文期刊] 2006(02)
10. [Kim J K;Lee C S Moisture diffusion of concrete considering selfdesiccation at early ages](#)[外文期刊] 1999(12)
11. 张鹏;赵铁军;Wittmann F. H [基于反向分析计算水泥基体的湿扩散系数](#)[期刊论文]-[水利学报](#) 2010(01)
12. [Bazant Z P Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete](#) 1972(01)
13. [Akita H;Fujiwara T;Ozaka Y A practical procedure for the analysis of moisture tansfer within concrete due to drying](#) 1997(03)
14. [Yuan Y;Wan Z L Prediction of cracking within early-age concrete due to thermal, drying shrinkage and creep behavior](#) 2002(07)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_kxjsygc201315021.aspx