

Doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.147

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



温湿度耦合效应下早龄期混凝土的相对湿度场

贺冯友^a, 陈朝晖^{a,b}, 夏成俊^a

(重庆大学 a.土木工程学院; b.山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:早龄期混凝土温度和相对湿度的时间-空间变化规律是揭示混凝土早期开裂的关键。为此,建立了早龄期混凝土温度-湿度耦合作用分析模型,采用无条件稳定向后差分格式,考虑水化作用、自干燥作用、温湿度扩散作用以及温湿度耦合机制,分析早期混凝土相对湿度的时间-空间变化规律,定量揭示相对湿度的空间不均匀性,分析了水灰比、环境相对湿度以及表面水分交换系数等对相对湿度及其空间变化规律的影响。与实验结果的对比验证了模型的合理性,结果表明:温湿度扩散作用对相对湿度的影响随距扩散表面距离的增加而减小,水灰比对相对湿度的影响与位置无关,而环境相对湿度和表面水分交换系数主要影响混凝土扩散表面附近的相对湿度场。

关键词:早龄期混凝土;水化作用;相对湿度;有限差分法

中图分类号:TU528.0 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2020)01-0108-08

Relative humidity analysis of early-aged concrete based on temperature and humidity interaction

He Fengyou^a, Chen Zhaohui^{a,b}, Xia Chengjun^a

(a. School of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The temporal and spatial variation characteristic of the temperature and relative humidity of early-aged concrete are dominant for the shrinkage cracking of early-aged concrete. The temperature and relative humidity interaction analysis model of early-aged concrete is present by the application of unconditional stable backward finite differential method. In the proposed model, the coupling effects of hydration, chemical drying and the diffusion of temperature and relative humidity are taken into account. The temporal and spatial variation of the relative humidity of early-aged concrete are simulated. The rationality of the proposed model is verified by the comparison with the test results. The parameters analysis have shown that the influence of temperature and humidity diffusion on relative humidity decreases with the distance from the diffusion surface. The influence of water-cement ratio on relative humidity is independent of position. The environmental humidity and surface moisture exchange coefficients primarily affect the relative humidity field near the concrete diffusion surface.

Keywords: early-age concrete; coupling hydration; relative humidity; finite difference method

收稿日期: 2019-04-26

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703005)

作者简介: 贺冯友(1993-), 主要从事早龄期混凝土湿度场研究, E-mail: 453802330@qq.com。

陈朝晖(通信作者), 女, 教授, 博士生导师, E-mail: zhaohuic@cqu.edu.cn。

Received: 2019-04-26

Foundation items: National Key R & D Projects(No. 2017YFC0703005)

Author brief: He Fengyou(1993-), main research interest: humidity field of early-age concrete, E-mail: 453802330@qq.com.

Chen Zhaohui(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhaohuic@cqu.edu.cn.

大量工程实践表明^[1-2],混凝土内部相对湿度是影响混凝土早期收缩变形的主要因素^[3-5],而混凝土的非均匀收缩变形以及钢筋的约束作用,将产生收缩应力并导致早期混凝土开裂^[6]。尤其对于高强混凝土,其内部相对湿度变化与干燥作用更为显著,因此,研究混凝土内部相对湿度的时-空变化规律对混凝土早期收缩变形及其开裂机制的研究具有重要意义。

早龄期混凝土内部的水化作用、自干燥及干燥等物理化学作用相互耦合,相对湿度的时-空变化主要受水化作用、自干燥作用以及与环境温湿度交换作用的影响。Bazant 等^[7]对混凝土早龄期温度、相对湿度变化进行了试验与理论研究,提出了考虑水分扩散和水泥水化耗水的相对湿度控制方程。Gawin 等^[8]基于 Hassanizadeh-Gray 平均理论从细观力学的角度建立了湿-热化学力学模型,考虑了湿、热、水化作用之间的耦合,以及水化过程引起的混凝土性能变化。杜明月等^[9-10]在此基础上改进了微观孔结构演变模型,模拟结果与试验吻合较好,但总体而言,细观力学方法计算过程繁复。Mu 等^[11]基于 Fick 第二定律扩散方程模拟混凝土内部相对湿度场,但忽略了自干燥对水分的消耗,结果与实际情况相差较大。张君等^[12-14]采用差分法模拟混凝土内部相对湿度场,考虑了自干燥与扩散过程,但未涉及温度与相对湿度的耦合作用。

笔者基于 Fick 扩散定律,采用向后差分法建立了早龄期混凝土温-湿度耦合作用模型,分析了早龄期混凝土相对湿度场的时-空变化特性。所提出方法为无条件稳定的半解耦方法,与混凝土棱柱体试件试验结果对比验证了模型的合理性与有效性,并分析了水灰比、环境相对湿度及混凝土表面交换系数等因素对早龄期混凝土相对湿度场的影响。

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{c\rho} = \frac{\Delta \alpha}{c\rho} \cdot Q_{\text{total}} = \int \left\{ \left\{ \alpha_c \cdot \frac{B}{A} \left[\ln \left(\frac{\alpha_u}{\alpha_c} \right) \right]^{(B+1)/B} - p \right\} (RH)^n + p \right\} dt_e \cdot \frac{Q_{\text{total}}}{c\rho} \quad (2)$$

式中: A 、 B 为经验常数,由等温实验结果拟合确定; α_u 为最终水化程度,由于水泥的水化作用通常不可能充分进行,其最终水化程度 α_u 与水灰比有关^[17]。

$$\alpha_u = \frac{1.031\tau w/c}{0.194 + \tau w/c} \quad (3)$$

水化程度与最终水化程度的经验关系为^[18]

$$\alpha = \alpha_u \exp \left[- \left(\frac{A}{t_e} \right)^B \right] \quad (4)$$

式中: t_e 为达到参考温度 20°C 时的等效龄期,Pane 等^[18]基于阿伦尼乌斯公式得出了等效龄期与真实龄期的关系

$$t_e = \int_0^t \exp \left(\frac{1}{R} \left(\frac{U_{ar}}{273+20} - \frac{U_{aT}}{273+T} \right) \right) dt \quad (5)$$

式中: R 为理想气体常数,为 $8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$; U_{ar} 和 U_{aT} 分别代表参考温度 20°C 下和实际温度下水泥水

1 早龄期混凝土物理化学模型

造成早龄期混凝土内部温度、相对湿度变化的物理化学过程主要包括水化放热作用、温度扩散作用、自干燥作用和湿度扩散作用,并且温度与相对湿度相互耦合,如图 1 所示。各物理化学过程主要受水化程度的影响,可以表示为水化程度的函数。含水率和相对湿度是表征混凝土内部水分含量的常用参数,考虑到检测的难易,选用相对湿度表示。笔者主要基于已有的早龄期混凝土各物理化学过程研究成果,主要考虑水化作用、自干燥及环境温-湿度交换作用,分析相对湿度场的时-空变化规律。

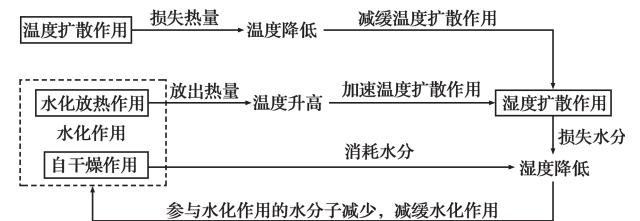


图 1 早龄期混凝土温-湿度耦合作用机理

Fig.1 Interaction of temperature and relative humidity of early age concrete

1.1 混凝土水化放热模型

水化作用主要与混凝土组分、水灰比、含水率、环境温湿度等有关。水化过程放热可表示为水化程度 α 的函数,即^[15]

$$Q = \alpha \cdot Q_{\text{total}} \quad (1)$$

式中: Q_{total} 为混凝土完全水化后的最终放热总量,对于 C50 混凝土可取值为 340 kJ/kg 。

根据热传导理论,混凝土单位体积内由于水化热产生的温度增量为^[16]

化反应的活化能,当 $20^\circ\text{C} < T < 80^\circ\text{C}$ 时, $U_{ar} = U_{aT} = 33\,500 \text{ J/mol}$ 。

侯东伟等^[19]通过大量实验建立了相对湿度与水化程度的关系

$$\frac{d\alpha}{dt_e} = k (RH)^n + p \quad (6)$$

式中: n 和 p 为经验常数。

由式(2)、式(5)可导出水化程度与等效龄期的关系

$$\frac{d\alpha}{dt_e} = \left\{ \alpha_c \cdot \frac{B}{A} \left[\ln \left(\frac{\alpha_u}{\alpha_c} \right) \right]^{(B+1)/B} - p \right\} (RH)^n + p \quad (7)$$

1.2 自干燥模型

早龄期混凝土内部由于水化作用引起的相对湿度降低称为混凝土的自干燥作用。Zhang 等^[16]在实验的基础上,提出了混凝土自干燥模型为

$$\frac{1 - RH_{s,\alpha}}{1 - RH_{s,\alpha_u}} = \left(\frac{\alpha - \alpha_c}{\alpha_u - \alpha_c} \right)^\beta \quad (8)$$

式中: $RH_{s,\alpha}$ 和 RH_{s,α_u} 分别为水化程度为 α 、 α_u 时自干燥产生的相对湿度增量; α_c 为相对湿度开始降低时的水化程度; β 为经验常数。

1.3 温度与相对湿度扩散模型

除自身物理化学反应引起混凝土内部温度-相对湿度的变化外, 早龄期混凝土与环境之间还存在温、湿度的扩散效应。

温度扩散主要受材料导热性能及环境温度的影响。根据固体材料热传导理论, 混凝土早龄期温度扩散方程可写为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_T \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (9)$$

式中: $D_T = k/c\rho$ 为温度扩散系数; k 为混凝土传热系数; c 为混凝土比热系数; ρ 为混凝土密度; T 为摄氏温度; q 为单位时间单位体积混凝土的水化热。

对于绝热边界, 其边界条件为

$$-D_T \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (10)$$

对于温度扩散边界, 假定流经混凝土表面的热流量与混凝土表面温度 T_s 和周围环境温度 T_c 之差成正比

$$-D_T \frac{\partial T}{\partial x} = \beta_T (T_s - T_c) \quad (11)$$

式中: β_T 为混凝土与空气的对流换热系数, 一般取值为 $17\ 100\ \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。

相对湿度扩散过程与温度类似, 其控制方程为

$$\frac{\partial (RH)}{\partial t} = D_H \left(\frac{\partial^2 (RH)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (RH)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (RH)}{\partial z^2} \right) \quad (12)$$

式中: D_H 为相对湿度扩散系数。

对于绝湿边界, 其边界条件为

$$-D_H \frac{\partial (RH)}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

对于湿度扩散边界, 假定流经混凝土表面的相对湿度与混凝土表面相对湿度 H_s 和周围环境相对湿度 H_c 之差成正比

$$-D_H \frac{\partial (RH)}{\partial x} = f (H_s - H_c) \quad (14)$$

式中: f 为表面水分交换系数, 其大小与内外相对湿度差和风速有关

$$f = A (0.253 + 0.06v_a) (H - H_c) \quad (15)$$

式中: A 为经验系数; v_a 为平均风速。

1.4 考虑耦合效应的扩散系数修正

早期混凝土温度和相对湿度扩散系数均会随着水化进程而改变, 这也是早龄期混凝土温-湿度耦合作用的重要特点。Schindler 等^[20] 通过试验研究得出了温度扩散系数和水化程度的关系为

$$D_T(\alpha) = D_u (1.33 - 0.33\alpha) \quad (16)$$

式中: D_u 为混凝土最终导热系数。

欧洲混凝土规范^[21] 给出了相对湿度扩散系数与相对湿度的经验关系

$$D_H(H) = D_{\max} \left[m + \frac{1 - m}{1 + [(1 - RH)/(1 - h_c)]^n} \right] \quad (17)$$

式中: D_{\max} 为饱和状态下的相对湿度扩散系数, 为常数; h_c 为相对湿度下降临界值; m 和 n 为经验系数。

2 温-湿度耦合作用分析的向后差分格式

2.1 温度和湿度场的向后差分格式

差分法是用差分代替微分、用差商代替导数, 解为准确解函数在结点上的近似值。该方法求解效率高, 而向后差分法具有无条件稳定、易求解和精度高的特点, 因此, 采用向后差分法模拟一维扩散条件下早龄期混凝土内部温度场与相对湿度场。根据不同温度、相对湿度分布和边界条件可将分析结点划分为内部结点、绝热(绝湿)结点和非绝热(非绝湿)结点 3 种。

采用向后差分将式(12)变换为二阶差分方程

$$-r (RH)_{i+1}^k + (1 + 2r) (RH)_i^k - r (RH)_{i-1}^k = (RH)_{i-1}^{k-1} \quad (18)$$

式中: i 和 k 分别为结点的编号和迭代时间步; $r = D_H \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}$ 。

温度场的差分解法与相对湿度场类似。

2.2 温-湿度耦合作用分析模型

温-湿度耦合作用, 一方面体现在水化作用和扩散作用消耗水分, 降低相对湿度从而影响水化进程; 另一方面, 温度扩散系数和湿度扩散系数会随温度、相对湿度以及水化进程的变化而变化。为此, 采用半解耦的方式模拟。即认为当时间步长足够小时, 温度扩散系数与湿度扩散系数在该时间步长内为常数, 则在每一时间步内, 可以先考虑自干燥和水化作用对温度、相对湿度场的影响, 再考虑温、湿度扩散作用对湿度场的影响, 从而得到考虑耦合效应的温度场与相对湿度场变化规律。

1) 划分混凝土试件或构件的差分网格, 确定温度初始值 T_0 和相对湿度初始值 RH_0 , 选择时间步长 Δt 。

2) 令 $t = k \cdot \Delta t$, 对时间步 $k = 1$, 分两步进行耦合作用分析。

①以温度场 $T = T_0$ 、相对湿度场 $RH = RH_0$ 为初始条件, 在步长 Δt 内, 先只考虑自干燥作用和水化作用, 确定经过 Δt 后的温度场与相对湿度场: 在初始条件 $T = T_0$ 、 $RH = RH_0$ 下, 利用式(7)确定经过 Δt 后的水化程度 α 、自干燥作用引起的相对湿度

损失量 $\Delta RH_{\text{hydration}}$ (式(8))以及水化作用产生的温度增量 ΔT_1 (式(2)),得到温度场 ($T + \Delta T_1$) 和相对湿度场 ($RH - \Delta RH_{\text{hydration}}$);

②进一步考虑温度和湿度扩散作用:先根据该时间步的初始条件 $T = T_0$ 、 $RH = RH_0$,修正温度扩散系数(式(16))和湿度扩散系数(式(17));再分别计算在经过 Δt 后由温度扩散引起的温度变化 ΔT_2 (式(9))和由湿度扩散引起的相对湿度变化 ΔRH_{diff} (式(12)),从而得到温度场 ($T + \Delta T_1 - \Delta T_2$) 和相对湿度场 ($RH - \Delta RH_{\text{hydration}} - \Delta RH_{\text{diff}}$),当 Δt 足够小时,可认为该温度场和相对湿度场是考虑温湿度耦合作用后经过 Δt 后的温度场和相对湿度场。

3)对于 $k > 1$,以上一时间步的温度场和相对湿度场为初始条件,重复步骤 2),得到 $t = k \cdot \Delta t$ 时刻的温度和相对湿度。重复上述过程,直到达到设定的计算时间,从而得到随时间变化的早龄期混凝土温度与相对湿度场。

温-湿度耦合作用分析流程图如图 2 所示。

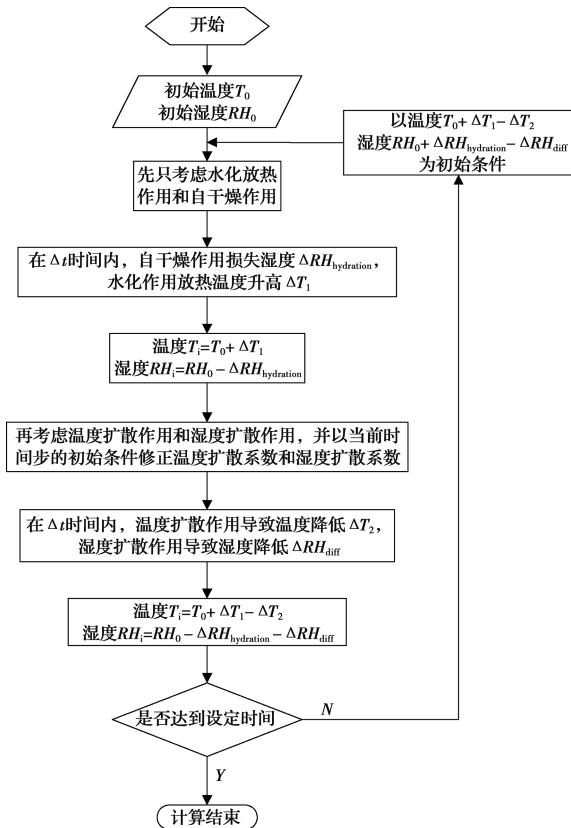


图 2 温度-相对湿度耦合作用模型流程图
Fig.2 Flow chart of temperature-relative humidity coupling model

3 模型验证与参数分析

3.1 模型验证

Zhang 等^[16]给出了混凝土棱柱体试件在一维扩散条件下内部不同位置处相对湿度随龄期的变化

的试验结果,试验装置如图 3 所示,试件浇筑在 200 mm×200 mm×800 mm 的木质模具中,并在模具的内表面铺上塑料膜,只留上面浇筑面与空气接触,同时,保持环境温度为 20 ℃,相对湿度为 0.6。对此试验进行模拟分析,验证所建模型的合理性。混凝土试件配合比见表 1,相对湿度场模拟主要参数见表 2。

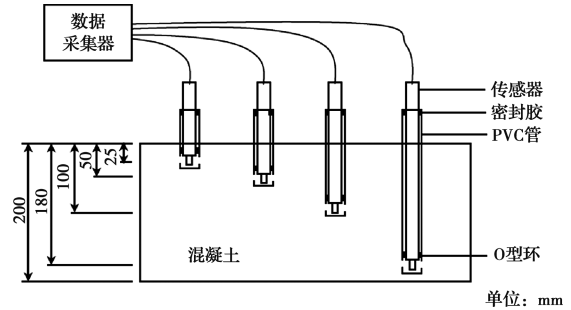


图 3 试验装置示意图^[16]
Fig.3 The diagram of test device^[16]

试件不同位置处相对湿度的模拟结果与试验结果的对比如图 4 所示, L 为测量位置到扩散表面的距离,后文同此。结果表明,相对湿度场分析结果与

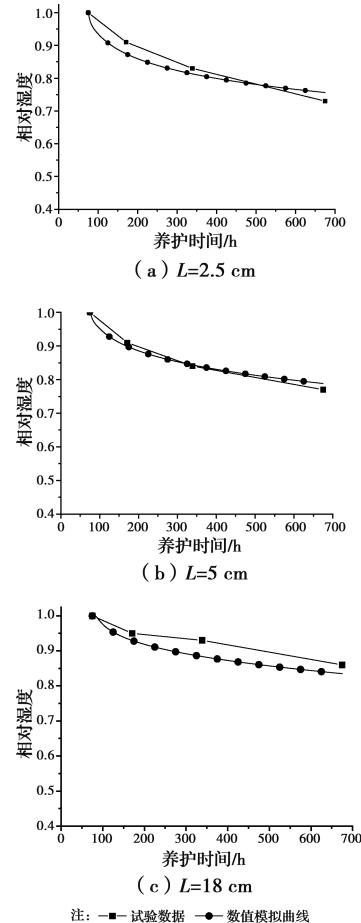


图 4 混凝土相对湿度分析结果与试验结果的比较
Fig.4 The comparison between numerical results and test results

试验吻合。距离扩散表面 5 cm 处的相对湿度场分析结果同试验一致。距离扩散表面 2.5 cm 处模拟结果在早期较试验略微偏小, 主要因为试验初期相对湿

度较大, 水分扩散系数偏大, 扩散速度较快。距离扩散表面 18 cm 处分析结果较试验结果也略微偏低, 是因为距离扩散表面较远, 受水分扩散的影响较小。

表 1 混凝土配比

Table 1 Concrete mixture ratio

混凝土标号	水灰比	水泥/(kg·m ⁻³)	水/(kg·m ⁻³)	砂/(kg·m ⁻³)	石/(kg·m ⁻³)	粉煤灰/(kg·m ⁻³)
C50	0.54	345	185	685	1 090	85

表 2 模型参数取值

Table 2 Modeling parameters

k	n	p	$H_{s,u}$	α_c	α_u	$T_c/^\circ\text{C}$	H_c	D_u	D_1	α_0	h_c	n
0.002 06	35.58	0.000 04	0.733	0.490 9	0.757 1	20	0.6	4 020	36	0.01	0.96	1.72

图 4 还显示, 混凝土内部不同位置处的相对湿度随龄期而降低的速率逐渐减缓, 表明水化反应速率随龄期的增加而降低, 导致水分消耗速率减缓; 且由于扩散作用导致水分损耗速率与混凝土表面相对湿度与周围环境相对湿度之差成正比, 而相对湿度差随龄期的增加而减小, 从而减缓了相对湿度变化速率。

由图 5 可见, 同一龄期混凝土内部不同位置处的相对湿度不同, 距离扩散表面越近, 相对湿度越低。且越靠近扩散表面, 相对湿度变化率越大, 当距扩散表面足够远时, 相对湿度变化趋近于零, 而随龄期有增大的趋势。这是因为同一龄期混凝土内部不同位置处水化程度接近, 水化作用消耗的水分相差不大, 内部相对湿度主要受扩散作用影响, 因此, 越靠近混凝土表面, 扩散作用越明显, 相对湿度降低越显著, 湿度变化越大, 会导致混凝土收缩应变越不均匀, 使其变形受到相互约束, 产生约束收缩应力, 使混凝土出现早期开裂, 由此揭示了混凝土早期开裂易从表面开始的原因。

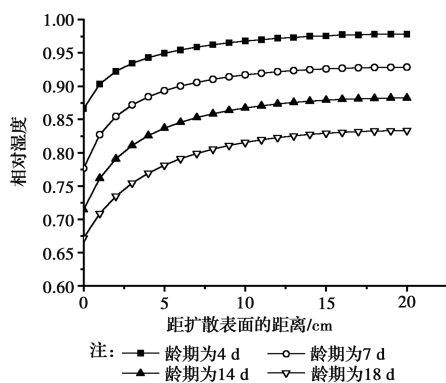


图 5 不同龄期的相对湿度场

Fig.5 The relative humidity field in different age

3.2 参数影响分析

早龄期混凝土相对湿度场受自干燥、水化作用

以及扩散作用的影响。自干燥与水化作用速率主要取决于水灰比; 水分扩散速率主要取决于扩散系数、内外相对湿度差和表面水分交换系数, 其中, 环境相对湿度和表面交换系数变化较大, 为此, 重点分析混凝土水灰比、环境相对湿度和表面交换系数对早龄期混凝土相对湿度场的影响, 仍采用 3.1 节所述混凝土棱柱体试件。各参数分析时, 均保持其余参数不变只改变被分析参数取值。

3.2.1 水灰比 分别取水灰比为 0.3(C80)、0.5(C50)和 0.8(C30), 相对湿度场模拟主要参数取值如表 3 所示, 模拟结果如图 6 所示。由图 6 可见: 水灰比对于早龄期混凝土相对湿度随时间的变化有着较明显的影响。水灰比越低, 水泥含量越高(水灰比 0.8, C30 混凝土), 水泥与水之间的接触愈发充分, 自干燥越显著, 相对湿度的降低速度越快, 开裂风险可能越大。对比结果还显示, 水灰比对 C30 和 C50 混凝土的影响较小, 而对 C80 这样的高强度混凝土影响显著, 原因在于高强度混凝土内部水泥和水之间的接触充分, 自干燥作用更加剧烈。

图 7 显示, 同一位置处不同水灰比下相对湿度大小不同, 但随位置的变化趋势相似, 可见水灰比整体均匀地改变了混凝土内部的相对湿度分布, 对相对湿度的影响基本与位置无关。

表 3 不同水灰比下相对湿度场模拟主要参数取值

Table 3 Main parameters of relative humidity field simulation under different water cement ratio

	C30	C50	C80
n	82.08	35.58	47.36
p	0.000 03	0.000 04	0.000 06
$H_{s,u}$	0.835	0.733	0.703
α_c	0.520 2	0.490 9	0.489 9
α_u	0.824 6	0.757 1	0.626 1

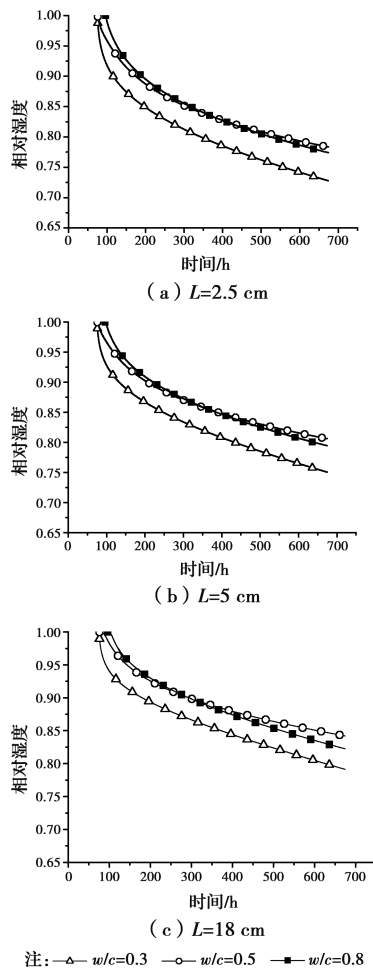


图 6 不同水灰比下相对湿度的比较

Fig.6 Comparison of relative humidity field under different water cement ratio

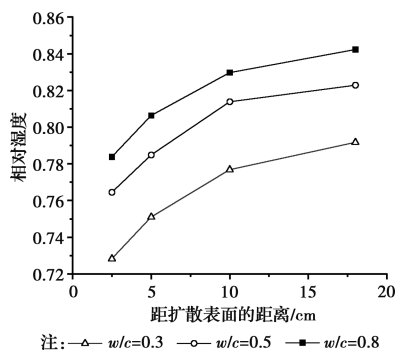


图 7 28 d 龄期不同水灰比下相对湿度-位置关系

Fig.7 Relationship between relative humidity and location with different water cement ratio at 28 d

3.2.2 环境相对湿度 分别取环境相对湿度为 0.4、0.6 和 0.8,结果见图 8。

由图 8 可见,环境相对湿度对混凝土相对湿度场的影响很大,较低的环境相对湿度将会加快混凝土相对湿度降低速率。这是由于扩散速率与内外相对湿度差成正比,外部相对湿度越低,混凝土相对湿

度降低越快。环境相对湿度对距扩散表面较近的混凝土内部相对湿度影响很大(如图 8(a)中距扩散表面 2.5 mm 处),而对深处的混凝土(如图 8(c)中距扩散表面 18 cm 处)几乎没有影响。可见,水分扩散的影响取决于到扩散表面的距离,距离扩散表面越近,扩散效果越明显;反之,影响越小。

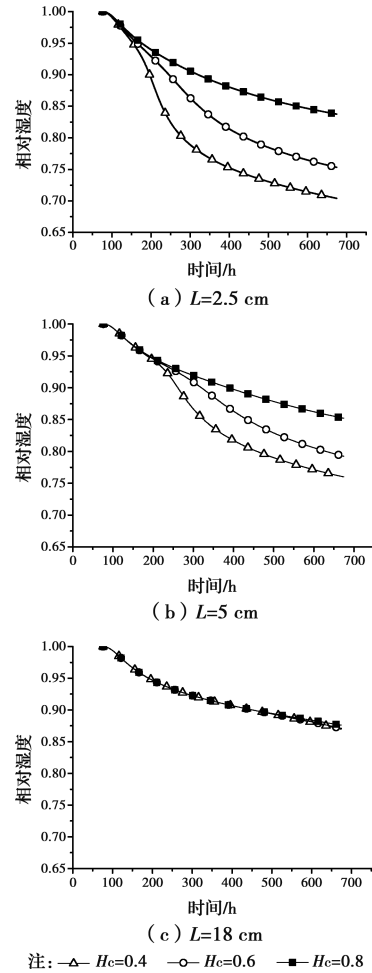


图 8 不同环境相对湿度下相对湿度的比较

Fig.8 Comparison of relative humidity field under different environmental relative humidity

3.2.3 表面交换系数 分别取表面交换系数为 1、0.5 和 0.25,模拟结果如图 9 所示。

由图 9 可见:混凝土相对湿度的降低速度和表面交换系数关系密切,表面交换系数越大,相对湿度降低越快。此外,不同位置处,表面交换系数对于相对湿度场的影响差异明显,越靠近扩散表面影响越大。如 28 d 龄期,距表面 2.5 cm 处(图 9(a)),交换系数从 0.25 增加到 0.5 时,相对湿度从 0.77 降低到了 0.72,而距表面 18 cm 处(图 9(c)),交换系数的改变对于相对湿度场的分布几乎没有影响。这也说明,水分扩散在靠近表面处更快,而远离扩散表面,相对湿度受扩散作用的影响很小。

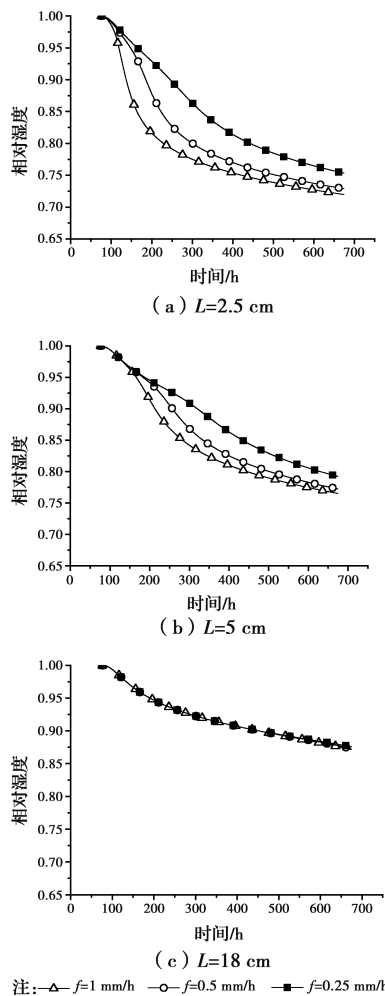


图 9 不同表面交换系数下相对湿度的比较

Fig.9 Comparison of relative humidity field under different surface emission coefficient

4 结论

采用向后差分稳定格式,建立了一维扩散状态下混凝土早龄期温-湿度耦合作用分析模型,主要考虑了水化作用、扩散作用以及温-湿度耦合作用,模拟了早龄期混凝土内部相对湿度的时-空变化规律。

1) 扩散作用对相对湿度的影响随距扩散表面距离的增加而减小。靠近扩散表面处,其相对湿度变化主要受扩散作用影响,相对湿度降低较快;距扩散表面较远时,相对湿度主要受自干燥作用影响,其降低速度相对较慢。因此,越靠近扩散表面,相对湿度变化越大,混凝土内部收缩应变越不均匀,在内部变形受到约束,从而产生约束收缩应力,易导致混凝土早期开裂。

2) 环境相对湿度、表面水分交换系数和水灰比等对早龄期混凝土相对湿度场的影响各不相同。其中,环境相对湿度和表面水分交换系数主要影响混凝土扩散表面附近的相对湿度场,距扩散表面足够

远处的相对湿度场基本不受影响;水灰比对相对湿度的影响与位置无关,几乎均匀地改变混凝土相对湿度。强度越高,水灰比越小,湿度降低越快,因此,对于高强度混凝土更应注意水分损失较快引起的收缩裂缝。

参考文献:

- [1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
ZHU B F. Thermal stresses and temperature control of mass concrete [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese)
- [2] 张君, 侯东伟, 高原. 混凝土自收缩与干燥收缩的统一内因[J]. 清华大学学报, 2010, 50(9): 1321-1324.
ZHANG J, HOU D W, GAO Y. Uniform driving force for autogenous and drying shrinkage of concrete [J]. Journal of Tsinghua University, 2010, 50(9): 1321-1324. (in Chinese)
- [3] 胡辉, 陈朝晖, 王晓莹, 等. 早龄期约束水泥砂浆环开裂预测模型分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(3): 19-25.
HU H, CHEN Z H, WANG X Y, et al. Cracking tendency prediction model of early-age restraint mortar ring [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2015, 37(3): 19-25. (in Chinese)
- [4] CHEN K, HU H, CHENZ H, et al. Cracking tendency prediction of high-performance cementitious materials [J]. Advances in Condensed Matter Physics, 2014, 2014: 1-12.
- [5] 赵国卫, 张雪, 白浩亮, 等. 基于 MATLAB 的高强混凝土早龄期湿度变形计算方法[J]. 工程建设与设计, 2017, 24(11): 146-148.
ZHAO G W, ZHANG X, BAI H L, et al. Calculation of moisture stress in-early-age of high strength concrete based on MATLAB software [J]. Engineering Construction and Design, 2017, 24(11): 146-148. (in Chinese)
- [6] WEI Y, GUO W Q, ZHENG X B. Integrated shrinkage, relative humidity, strength development, and cracking potential of internally cured concrete exposed to different drying conditions [J]. Drying Technology, 2016, 34(7): 741-752.
- [7] BAŽANT Z P, NAJJAR L J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete [J]. Matériaux et Constructions, 1972, 5(1): 3-20.
- [8] GAWIN D, PESAVENTO F, SCHREFLER B A. Hygro-thermo-chemo-mechanical modelling of concrete at early ages and beyond. Part I: hydration and hygro-thermal phenomena [J]. International Journal for

- Numerical Methods in Engineering, 2006, 67(3): 299-331.
- [9] 杜明月. 基于微孔结构演化的早龄期混凝土热-湿-力耦合模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- DU M Y. Thermo-hygro-mechanical model of early-age concrete based on micro-pore structure evolution[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.(in Chinese)
- [10] 杜明月, 田野, 金南国, 等. 基于水泥水化的早龄期混凝土温湿耦合研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(8): 1410-1416.
- DU M Y, TIAN Y, JIN N G, et al. Coupling of hygro-thermal field in early-age concrete based on cement hydration [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2015, 49(8): 1410-1416.(in Chinese)
- [11] MU R, FORTH J P. Modelling shrinkage of concrete from moisture lost using moisture diffusion theory[J]. Magazine of Concrete Research, 2009, 61(7): 491-497.
- [12] ZHANG J, QI K, HUANG Y. Calculation of moisture distribution in early-age concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(8): 871-880.
- [13] ZHANG J, GAO Y, HAN Y D. Interior humidity of concrete under dry-wet cycles[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(3): 289-298.
- [14] ZHANG J, WANG J H, GAO Y. Moisture movement in early-age concrete under cement hydration and environmental drying [J]. Magazine of Concrete Research, 2016, 68(8): 391-408.
- [15] SCHINDLER A K, FOLLIARD K J. Heat of hydration models for cementitious materials [J]. ACI Materials Journal, 2005, 102(1): 24-33.
- [16] ZHANG J, HOU D W, GAO Y. Calculation of shrinkage stress in early-age concrete pavements. I: calculation of shrinkage strain [J]. Journal of Transportation Engineering, 2013, 139(10): 961-970.
- [17] RASTRUP E. Heat of hydration in concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1954, 6(17): 79-92.
- [18] PANE I, HANSEN W. Concrete hydration and mechanical properties under nonisothermal conditions [J]. ACI Materials Journal, 2002, 99(6): 534-542.
- [19] 侯东伟, 张君, 陈浩宇. 干燥与潮湿环境下混凝土抗压强度和弹性模量发展分析[J]. 水力学报, 2012, 43(2): 198-208.
- HOU D W, ZHANG J, CHEN H Y. Development of strength and elastic modulus of concrete under moisture and drying curing conditions [J]. Hydrographic Journal, 2012, 43(2): 198-208.(in Chinese)
- [20] SCHINDLER A K. Concrete hydration, temperature development, and setting at early-ages [D]. Austin: The university of Texas at Austin, 2002.
- [21] CEB-FIP model code for concrete structures[S]. Paris: Committee Euro-international du Beton Federation International de la Precon-strainte, 2010.

(编辑 胡玲)