文章编号:1007-9629(2022)03-0242-06

考虑内养护剂动态释水的混凝土自干燥计算模型

丁小平[1,2], 张 君[2], 韩宇栋[1,*], 齐立剑[3], 李 威[1]
(1.中冶建筑研究总院有限公司,北京 100088; 2.清华大学 土木工程系,北京 100084;
3.中国二十冶集团有限公司,上海 201900)

摘要:基于毛细孔含水量变化的混凝土内部相对湿度理论计算模型,建立了考虑内养护剂动态释水的混凝土自干燥计算模型,并与试验结果进行对比.结果表明:该模型实现了对内养护剂动态释水过程的计算,且计算结果与试验结果吻合较好;混凝土强度越高,内养护对自干燥效应改善越显著;采用本模型精确分析可指导内养护混凝土配合比设计.

关键词:混凝土;内养护;自干燥;相对湿度;计算模型
中图分类号:TU528.01 **文献标志码**:A **doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.03.004

Calculation Model of Concrete Self-desiccation Considering Dynamic Water Release of Internal Curing Agent

DING Xiaoping[1,2], *ZHANG Jun*[2], *HAN Yudong*[1,*], *QI Lijian*[3], *LI Wei*[1]
(1. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, Beijing 100088, China;
2. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
3. China MCC20 Group Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: Based on the theoretical calculation model of concrete internal relative humidity changed with capillary water content in the cement paste, a calculation model of self-desiccation concrete considering the dynamic water release of internal curing agent was established and compared with the experimental results. The results show that the dynamic water release process of internal curing agent can be calculated by the model, and the calculated results are in good agreement with the experimental results. The higher the strength of concrete, the greater the improvement of self-desiccation effect by internal curing. The accurate analysis of the model can guide the mix proportion design of internal curing concrete.

Key words: concrete; internal curing; self-desiccation; relative humidity; calculation model

当无水或由胶凝材料水化引起的耗水速率大于外界水向内迁移速率时,水化就会从毛细孔中吸收水分,孔径较大的毛细孔开始干燥而无质量损失的现象称为混凝土自干燥现象[1].伴随着自干燥现象,混凝土内部毛细孔中开始出现凹液面,产生毛细孔负压力,使混凝土产生自收缩.现有研究表明,混凝土强度越高,其胶凝材料掺量越大,水胶比越低,自干燥效应越显著,自收缩越大[2-3],如C80混凝土28 d的自收缩约为0.03%[4],在有外部约束时,其引起的开裂风险不可忽视.对混凝土进行内养护是降低混凝土自干燥最有效的方法之一[5-6].

关于水泥水化和内养护剂对自干燥影响的试验研究相对较多,理论模型相对较少.密封混凝土内部相对湿度的下降是由自干燥引起的,此时混凝土内

收稿日期:2020-12-07; 修订日期:2021-01-18
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52108265, 52178263);北京市科技新星计划项目(Z201100006820024);海口市国家海洋经济创新发展示范城市建设课题资助项目(HHCL201814)
第一作者:丁小平(1990—),男,安徽怀宁人,中冶建筑研究总院有限公司工程师,博士. E-mail: ysdxdxp@163.com
通讯作者:韩宇栋(1986—),男,安徽安庆人,中冶建筑研究总院有限公司高级工程师,硕士生导师,博士.E-mail: hanyudong@cribc.com

部相对湿度从饱和状态开始的下降值可以表征自干燥效应的大小，可通过相对湿度间接计算其自干燥．目前采用较多的是Oh等[7]、张君等[8]提出的基于水泥水化度的混凝土内部相对湿度拟合模型．笔者在前期研究中从水化机理及毛细孔结构变化提出了基于含水量变化的混凝土内部相对湿度理论计算模型[9]，但该模型尚未考虑内养护混凝土内部内养护剂（IC）释水的影响．

内养护混凝土虽然可以采用基于水泥水化度的混凝土内部相对湿度拟合模型[10]来计算其密封条件下内部的相对相度，但一方面其拟合参数在实际应用中受到配合比、材料和环境等因素影响，准确度难以保证；另一方面拟合模型也无法真实描述内养护剂在混凝土内部相对湿度下降期的动态释水过程．本文基于毛细孔含水量变化的混凝土内部相对湿度理论计算模型，进一步考虑内养护剂的动态释水过程，建立了考虑内养护剂动态释水的混凝土自干燥计算模型，并计算了不同内养护水平对混凝土内部自干燥的影响．

1　模型的建立

首先，根据内养护混凝土胶凝材料水化耗水量、毛细孔含水量与相对湿度、混凝土内部临界含水量、内养护剂释水变化建立模型；然后，考虑由于胶凝材料水化使水泥石中毛细孔内部相对湿度下降后，内养护剂开始向毛细孔中释放水分，使毛细孔相对湿度上升，达到新的平衡状态，如此循环，建立考虑内养护剂动态释水的混凝土自干燥计算模型．

1.1　胶凝材料水化耗水量计算

以水＋水泥＋粉煤灰胶凝体系（W＋C＋F）和水＋水泥＋硅灰胶凝体系（W＋C＋S）为例，介绍水泥水化耗水量计算模型．设单位体积水泥石中，水、水泥、粉煤灰、硅灰的初始质量分别为 m_w、m_c、m_f、m_s；密度分别为 ρ_w、ρ_c、ρ_f、ρ_s；初始体积分别为 V_w、V_c、V_f、V_s．水泥石中任意位置 i 处，单位体积水泥石从 t 时刻开始，时间间隔 Δt 内水泥水化耗水量为 $\Delta W_{is,\,t+\Delta t}$．物理量及参数的计算公式[9]见表1，其中 p、k 分别为参数；α 为水化度；α_t、$\alpha_{t+\Delta t}$ 分别为 t、$t+\Delta t$ 时刻的水化度；t_e 为等效龄期；α_u 为最终水化度，即 t_e 趋近无穷大时的水化度；α_u、A、B、t_0 均为对水化度随等效龄期变化试验值进行拟合得到的拟合参数；α_c 为密封混凝土内部相对湿度开始下降时的水泥水化度，本文称之为临界水化度，可以通过湿度场试验中密封试件确定湿度开始下降时的龄期，再由水化度计算公式计算得到．

表1　物理量及参数的计算公式

Table 1　Calculation formulas of physical quantities and parameters

W＋C＋F	W＋C＋S
$\Delta W_{is,t+\Delta t}=0.401(1-p)k\rho_c(\alpha_{t+\Delta t}-\alpha_t)/\rho_w$	$\Delta W_{is,t+\Delta t}=(0.401+0.50m_s/m_c)(1-p)k\rho_c(\alpha_{t+\Delta t}-\alpha_t)/\rho_w$
$\alpha=\alpha_u\exp-\left(\dfrac{A}{t_e+t_0}\right)^B$	$\alpha=\alpha_u\exp-\left(\dfrac{A}{t_e+t_0}\right)^B$
$p=\dfrac{m_w/m_c}{m_w/m_c+\rho_w/\rho_c+(\rho_w/\rho_c)(m_f/m_c)}$	$p=\dfrac{m_w/m_c}{m_w/m_c+\rho_w/\rho_c+(\rho_w/\rho_c)(m_s/m_c)}$
$k=\dfrac{1}{1+(\rho_c/\rho_f)(m_f/m_c)}$	$k=\dfrac{1}{1+(\rho_c/\rho_s)(m_s/m_c)}$
$V_{cw}=V_w-0.401V_c\rho_c\alpha/\rho_w$	$V_{cw}=p-(0.401+0.50m_s/m_c)(1-p)k\rho_c\alpha/\rho_w$
$V_{cse}=\begin{cases}0, & \alpha\leqslant\alpha_c\\ 0.056(1-p)k\rho_c(\alpha-\alpha_c), & \alpha>\alpha_c\end{cases}$	$V_{cse}=\begin{cases}0, & \alpha\leqslant\alpha_c\\ (0.056+0.22m_s/m_c)\rho_c k(1-p)(\alpha-\alpha_c), & \alpha>\alpha_c\end{cases}$

1.2　毛细孔含水量与相对湿度计算模型

混凝土内部相对湿度为非饱和时，毛细孔含水量 W 与相对湿度 H 之间的关系[9]为：

$$\frac{W}{\rho_w V_p}=1-\exp\left[-\mu\exp(\lambda\alpha)\left(-\frac{2\gamma_w M_w}{\rho_w RT}\frac{1}{\ln H}\right)\right] \quad (1)$$

$$V_p=V_{cw}+V_{cse} \quad (2)$$

式中：γ_w 为水的表面张力，0.073 N/m；M_w 为水的摩尔质量，0.018 02 kg/mol；ρ_w 为水的密度，1 000 kg/m^3；R_g 为理想气体常数，8.314 J/(mol·K)；T 为热力学温度；θ 为水对水泥石的润湿角，假设水对水泥石绝对润湿，则 $\cos\theta=1$；μ、λ 是由压汞试验确定的描述毛细孔结构的常数；V_p 为水泥石毛细孔总体积；V_{cw}、V_{cse} 分别为毛细孔水体积、化学减缩形成的毛细孔空腔体积，其计算式见表1．

1.3　混凝土内部临界含水量计算模型

根据临界水化度 α_c，通过计算 V_{cw} 可计算出临界含水量 W_c．普通混凝土C30、C50、C80临界含水量

W_c分别为0.360 1、0.256 6、0.189 5 g/cm³，其水胶比[1)](m_w/m_b)分别为0.62、0.43、0.30[9]，水胶比越高，W_c越大.这说明临界含水量间接反映了毛细水的连通性，并可由此来判断混凝土内部相对湿度的下降时刻，模型计算中以此为相对湿度是否下降的判断标准，当毛细孔内含水量高于临界含水量时，其内部湿度为饱和阶段，反之则为下降阶段.

内养护混凝土与普通混凝土自干燥计算有相似之处.内养护混凝土内部相对湿度开始下降时，实际水泥石中相对湿度早已开始下降，由于内养护剂不断释放水分，使毛细孔相对湿度下降速率变缓，在水泥石中表现为相对湿度饱和期比普通混凝土延长[10].因此，对内养护混凝土应采用毛细孔水被水泥颗粒相互隔离时的含水量为湿度下降临界点.本文先拟合出普通混凝土临界含水量与水胶比计算公式(见式(3))，再根据内养护混凝土水胶比，计算内养护混凝土临界含水量W_c.

$$W_c = 0.534(m_w/m_b) + 0.028\,4 \tag{3}$$

1.4 内养护剂释水量计算模型

水泥石中毛细孔内部相对湿度下降后，内养护剂开始向毛细孔中释放水分，使毛细孔相对湿度上升，达到新的平衡状态，然后由于水泥水化作用，毛细孔中相对湿度再次下降，引发内养护剂再次向毛细孔释放水分，毛细孔中相对湿度再次上升，内养护剂孔隙内相对湿度再次达到新的平衡，如此循环.不同时刻内养护剂的释水量是内养护剂自身属性，且与孔隙结构密切相关.不同湿度条件下内养护剂的释水量可采用饱水的内养护剂等温脱附试验获得.为获得内养护剂释水量与环境湿度的关系模型，进而开展内养护混凝土湿度场的计算，本文以内养护剂——煅烧沸石和陶粒为例，在恒温23 ℃下，对其等温脱附曲线进行拟合，拟合结果见图1，其拟合式为：

$$w_w = \frac{H}{a(b-H)} + c \tag{4}$$

式中：w_w为内养护剂含水率；a、b、c为拟合参数.

由图1可见：采用式(4)可以较好地拟合2类内养护剂等温脱附试验结果；煅烧沸石拟合参数a、b、c分别为1.577、1.028、0.032 87；陶粒的拟合参数a、b、c分别为4.857、1.008、0.004 20.

假设内养护剂在混凝土内部均匀分布，根据内养护混凝土配合比，可得单位体积混凝土中内养护剂的质量m_z，而单位体积混凝土中内养护剂的含水量W_r为：

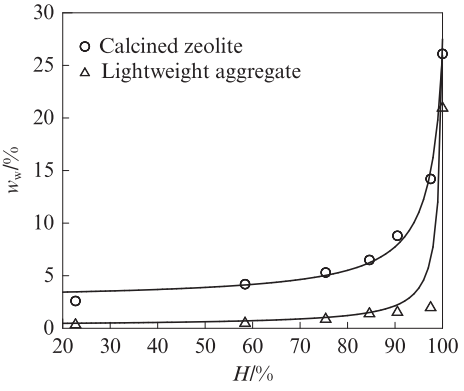

图1 煅烧沸石和陶粒的等温脱附拟合曲线

Fig. 1 Fitting isothermal desorption curves of calcined zeolite and lightweight aggregate

$$W_r = m_z w_w \tag{5}$$

由式(4)、(5)可得相对湿度变化时内养护剂能够释放到水泥石中的水的质量.

1.5 模型计算流程

采用上述模型，从混凝土浇筑开始，考虑胶凝材料水化耗水，给定边界条件为密封条件，考虑内养护剂动态释水过程的混凝土湿度场可通过下述计算步骤获得.

(1)计算水泥水化耗水量及水化耗水引起的相对湿度下降值.i节点初始时刻t(通常取混凝土拌和浇筑时刻)时的毛细孔含水量、相对湿度分别为$W_{i,t}$、$H_{i,t}$，从t开始，给定时间计算步长Δt，根据表1可计算所有节点单元水化耗水量$\Delta W_{is,t+\Delta t}$，得到当前含水量$W_{i,t}-\Delta W_{is,t+\Delta t}$，并将当前含水量与临界含水量$W_c$进行比较.若$W_{i,t}-\Delta W_{is,t+\Delta t} > W_c$，则该节点相对湿度为100%，否则通过式(1)计算由水泥水化耗水引起的相对湿度下降值$\Delta H_{is,t+\Delta t}$，同时将当前节点湿度相对值更新为$H_{i,t}-\Delta H_{is,t+\Delta t}$.

(2)若为普通混凝土，则跳过本步计算；若为内养护混凝土，则开始计算内养护剂的释水量.若上一步计算出该节点相对湿度为100%，则内养护剂不释放水分，否则由式(5)计算出该时间步长内的内养护剂释水量$\Delta W_{ir,t+\Delta t}$，并重新计算该节点相对湿度，直到该节点内部相对湿度与内养护剂内部相对湿度平衡为止，同时更新各节点含水量$W_{i,t+\Delta t}=W_{i,t}-\Delta W_{is,t+\Delta t}+\Delta W_{ir,t+\Delta t}$.

(3)开始计算下一个时间步长，直至设定龄期.

2 模型验证与应用

密封混凝土试件内部相对湿度下降是混凝土自

1) 文中涉及的水胶比、掺量等均为质量比或质量分数.

干燥现象的主要表现之一．用模型对密封环境下混凝土内部相对湿度随龄期发展进行计算，并与混凝土湿度场试验结果对比，可对计算模型进行验证．

2.1　混凝土配合比与相关参数

以C30、C50、C80强度等级的混凝土为模型计算对象，以煅烧沸石和陶粒为内养护剂，开展模型验证与应用研究．水泥、粉煤灰、硅灰、煅烧沸石的密度分别为3.13、2.20、2.22、2.10 g/cm^3．混凝土配合比及抗压强度见表2，表中陶粒和煅烧沸石均为干燥状态下的配合比，f_{28}为混凝土试件28 d抗压强度．混凝土成型前，先将内养护剂预吸水3 d；混凝土成型时，其他材料搅拌完成后，最后加入内养护剂，再搅拌2 min．自干燥试验采用3个温湿度传感器（分别记为S-1、S-2、S-3），自混凝土浇筑开始测试其内部相对湿度，试验时实验室温度为（23.0±0.5）℃．混凝土自干燥测试示意见图2．模型计算参数见表3．

表2　混凝土配合比及抗压强度

Table 2　Mix proportions and compressive strength of concretes

Specimen	m_w/m_b	Mix proportion/ (kg·m^{-3})									f_{28}/ MPa
		Cement	Water	Sand	Stone	Fly ash	Silica fume	Lightweight aggregate	Calcined zeolite	Internal curing water	
C30-IC1	0.572	252.0	181.0	473.0	867.0	63.0	0	288.0	0	60.7	38.3
C50-IC1	0.381	367.0	175.0	409.0	808.0	92.0	0	287.0	0	60.5	61.3
C80-IC1	0.243	494.0	134.0	309.0	864.0	0	55.0	281.0	0	59.3	92.8
C30-IC2	0.572	252.0	181.0	564.0	964.0	63.0	0	0	233.0	60.7	37.1
C50-IC2	0.381	367.0	175.0	500.0	905.0	92.0	0	0	233.0	60.5	57.9
C80-IC2	0.243	494.0	134.0	399.0	959.0	0	55.0	0	228.0	59.3	88.7

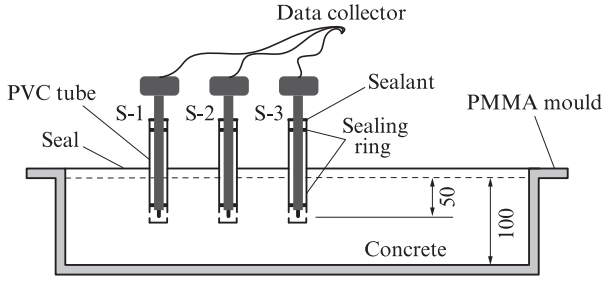

图2　混凝土自干燥测试示意图

Fig. 2　Schematic diagram of concrete self-desiccation measurement set-up (size: mm)

表3　模型计算参数

Table 3　Parameters of calculation model

Specimen	Cement hydration parameter				Pore structure parameter		
	α_u	A	B	t_0	μ	λ	W_e/(g·cm^{-3})
C30-IC1	0.922 2	45.54	1.07	11.00	0.000 8	3.41	0.335 0
C50-IC1	0.841 2	46.99	1.25	12.30	0.001 5	3.61	0.231 9
C80-IC1	0.629 8	43.76	1.25	13.10	0.006 1	3.02	0.168 7
C30-IC2	0.922 2	33.67	1.09	11.00	0.001 1	3.43	0.335 0
C50-IC2	0.841 2	39.84	1.18	12.10	0.002 3	3.21	0.231 9
C80-IC2	0.629 8	43.24	1.05	12.90	0.008 0	3.80	0.168 7

2.2　模型验证

内养护混凝土自干燥试验与计算结果对比见图3，图中为便于对比，将不考虑内养护作用的自干燥计算结果（without IC）也列于图中．由图3可见：模型计算结果与试验结果吻合良好，表明所建立的自干燥计算模型可以预测内养护混凝土自干燥；不考虑内养护释水作用，其计算结果远低于试验值，如60 d龄期时，若无内养护作用，混凝土相对湿度远低于内养护混凝土，且混凝土强度等级越高，差值越大，这进一步表明强度越高，内养护对自干燥效应改善越明显．

2.3　模型应用

内养护混凝土通过预先饱水的内养护剂向水泥石毛细孔内补水，来实现提升混凝土内部相对湿度，减小混凝土自收缩的目的．因此，在保证强度及其他性能的前提下，混凝土中能提供内养护水的量是内养护混凝土配合比设计的关键参数，也是内养护剂的主要考察指标．应用所建模型，通过计算分析内养护水平对混凝土自干燥的影响，为配合比设计提供参考．内养护水平以内养护水与水泥质量比，即内养护水灰比（m_{cw}/m_c）来表征．通过改变内养护剂的用量，可实现改变内养护水平的目的．以煅烧沸石内养护混凝土为例，研究内养护水平对混凝土自干燥的影响，其结果见图4，图中各配合比中最大m_{cw}/m_c＝0.240、0.165、0.120分别为C30-IC2、C50-IC2、C80-IC2的实际内养护水灰比．

由图4可见：（1）内养护水平越高，密封条件下混凝土内部相对湿度越高，即内养护剂掺量越大，越有利于提高混凝土内部相对湿度．（2）当C30-IC2的内养护水灰比从0.120提高到0.240时，其相对湿度的

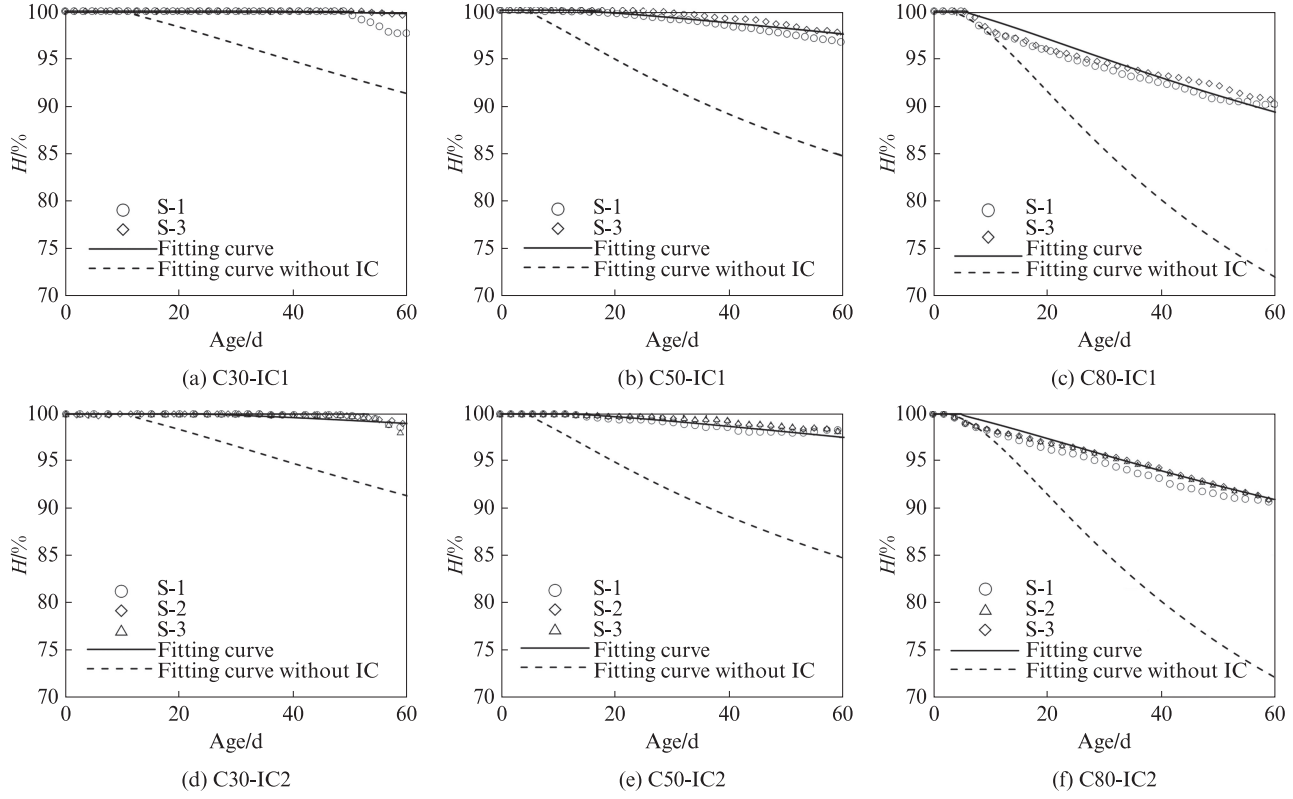

图3 内养护混凝土自干燥试验与计算结果对比

Fig. 3 Comparison results between experimental and calculation of self-desiccation of internal curing concrete

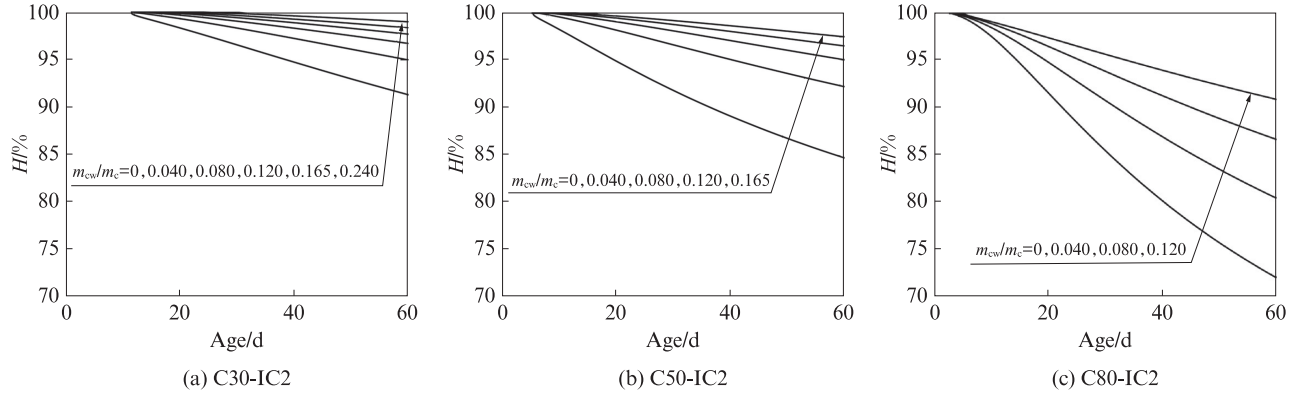

图4 内养护水平对混凝土自干燥的影响

Fig. 4 Effects of internal curing level on concrete self-desiccation

提升幅度非常小,继续增大内养护水灰比,其相对湿度也不会有明显的提升,C50-IC2也有类似的规律.因此本试验中采用的内养护水平对C30和C50混凝土已能够维持较低的自干燥水平.(3)当C80-IC2的内养护水灰比从0.080提高到0.120时,其60 d龄期时相对湿度提高了4%,且低于C30-IC2和C50-IC2同期的相对湿度.因此,对C80混凝土,提高其内养护水平还可能进一步降低混凝土的自干燥水平.

综上,只要内养护剂吸水脱水性能已知,采用所建模型即可分析计算不同内养护剂掺量对混凝土自干燥的影响,进而指导内养护混凝土配合比设计.这里需要特别指出的是,内养护剂的掺量除了需要考虑其提供的内养护水量之外,通常还要考虑其掺入对混凝土其他性能的影响,例如新拌混凝土流动性、工作性、可浇筑性以及混凝土的早期及长期强度、弹性模量等力学性能,因此在未来实际应用中,内养护剂的掺量要综合考察其对混凝土各项性能的影响,以此来确定其最佳掺量.

3 结论

(1)对内养护剂等温脱附数据进行了拟合,内养护剂含水率计算公式能够很好地反映内养护剂在不

同相对湿度条件下的含水率,再结合内养护剂掺量,实现了对内养护剂释水量随相对湿度变化的实时计算.

(2)模型计算结果与试验结果吻合较好,所建立的自干燥计算模型可以预测内养护混凝土自干燥.若不考虑内养护释水作用,其计算结果远低于试验值,且混凝土强度等级越高,差值越大,即混凝土强度越高,内养护对自干燥效应改善越明显.

(3)采用所建模型可分析计算内养护对混凝土自干燥的影响,进而可指导内养护混凝土配合比设计.目前内养护剂的释水性能都是由所选材料决定,内养护效率未必最佳,未来还可基于所建模型,逆向设计与混凝土自干燥需求相匹配的内养护剂.

参考文献:

[1] 蒋正武,孙振平,王新友,等.国外混凝土自收缩研究进展评述[J].混凝土,2001(4):18,30-33.
JIANG Zhengwu, SUN Zhenping, WANG Xinyou, et al. Review on research progress of autogenous shrinkage of concrete overseas[J]. Concrete, 2001(4):18, 30-33.(in Chinese)

[2] ZHANG J, HOU D W, SUN W. Experimental study on the relationship between shrinkage and interior humidity of concrete at early age[J]. Magazine of Concrete Research, 2010, 62(3): 191-199.

[3] HAN Y D, ZHANG J, LUOSUN Y M, et al. Effect of internal curing on internal relative humidity and shrinkage of high strength concrete slabs[J]. Construction and Building Materials, 2014, 61(2):41-49.

[4] ZHANG J, HAN Y D, GAO Y. Effects of water-binder ratio and coarse aggregate content on interior humidity, autogenous and drying shrinkage of concrete[J]. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(1):184-189.

[5] 王立成,张磊.混凝土内养护技术研究进展[J].建筑材料学报,2020,23(6):1471-1478.
WANG Licheng, ZHANG Lei. Research progress on concrete internal curing technology[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(6):1471-1478.(in Chinese)

[6] 唐冬云,谢肖礼,程华强,等.硅烷偶联剂改性轻集料及其内养护性能[J].建筑材料学报,2019,22(3):394-400.
TANG Dongyun, XIE Xiaoli, CHNEG Huaqiang, et al. Internal curing properties of lightweight aggregate modified with silane coupling agent[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 394-400.(in Chinese)

[7] OH B H, CHA S W. Nonlinear analysis of temperature and moisture distributions in early-age concrete structures based on degree of hydration[J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(5): 361-370.

[8] ZHANG J, QI K, HUANG Y. Calculation of moisture distribution in early-age concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(8):871-880.

[9] DING X P, ZHANG J, WANG J H. Integrative modeling on self-desiccation and moisture diffusion in concrete based on variation of water content[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 97:322-340.

[10] ZHANG J, WANG J H, HAN Y D. Simulation of moisture field of concrete with pre-soaked lightweight aggregate addition[J]. Construction and Building Materials, 2015, 96:599-614.