

文章编号:1007-9629(2022)06-0628-07

考虑水化进程的混凝土表面系数试验与模拟

王家赫^{1,2,*}, 谢永江^{1,2}, 冯仲伟^{1,2}, 仲新华^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道建筑研究所, 北京 100081;

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司 高速铁路轨道技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要:测定了 3 个强度等级混凝土在不同水化进程时的表面系数,并基于水泥水化理论提出了考虑水化进程的混凝土表面系数理论模型.结果表明:混凝土的表面系数与其表面湿度状态密切相关,当其处于湿度饱和期时,表面系数仅受环境因素影响;当其处于湿度下降期时,表面系数与混凝土的强度等级和水化程度有关;混凝土表面系数理论模型充分考虑了混凝土表面湿度状态和水化程度的影响,可以准确计算不同条件下的表面系数.

关键词:混凝土;表面系数;水化程度;失水量;表面湿度

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.06.012

Experimental and Theoretical Study on Concrete Surface Factor Considering Hydration Process

WANG Jiahe^{1,2,*}, XIE Yongjiang^{1,2}, FENG Zhongwei^{1,2}, ZHONG Xinhua^{1,2}

(1. Railway Engineering Research Institution, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing

100081, China; 2. State Key Laboratory for Track Technology of High-speed Railway, China Academy of

Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: The surface factor of concrete of three strength grades in different hydration processes was measured. Based on cement hydration theory, a theoretical model of concrete surface factor considering hydration process was proposed. The results show that the surface factor of concrete is closely related to its surface humidity state. When it is in the moisture saturation period, its surface factor is only affected by environmental factors. When it is in the moisture decline period, its surface factor is related to the strength grade and hydration degree of concrete. In the surface factor calculation model the influence of concrete surface moisture state and hydration progress has been fully considered, and the surface factor under different conditions can be accurately calculated.

Key words: concrete; surface factor; degree of hydration; water loss; surface humidity

混凝土的表面干燥作用是指干燥面与周围环境之间的水分交换作用.在该过程中,混凝土的表面水分散失到周围环境,从而导致混凝土的表面毛细孔水分含量减少,湿度水平降低.混凝土的湿度变化是其收缩应变发展的本质影响因素,在环境干燥作用下,混凝土的表面湿度逐渐下降,收缩应变逐渐发展^[1-2].表面干燥作用不仅影响混凝土表面的湿度变

化和收缩应变发展,对其内部湿度场和收缩应变场的影响同样显著.在表面干燥作用下,混凝土内部将产生湿度梯度,进而产生非线性收缩应变.在结构约束和收缩变形梯度的耦合作用下,混凝土结构内部将产生收缩应力,当应力超过抗拉强度时就会出现开裂^[3-5].因此,对表面干燥作用下混凝土表面的水分交换特征进行深入研究是十分必要的.

收稿日期:2021-03-29; 修订日期:2021-07-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51908550)

第一作者(通讯作者):王家赫(1990—),男,辽宁盖州人,中国铁道科学研究院集团有限公司副研究员,博士.E-mail:wangjiahe13@tsinghua.

混凝土表面系数(a_m)是用来描述干燥表面与周围环境之间水分交换速率的重要参数,是计算混凝土内部湿度场的重要边界条件.在以往的研究中,人们通常认为 a_m 是一个与水化程度无关的常数^[6].然而,随着研究的不断深入,人们发现假定 a_m 为常数将会高估其表面干燥失水量,进而导致混凝土湿度场等的计算误差.因此,本文将通过试验研究 a_m 与水化程度、湿度水平之间的关系,并提出考虑上述因素的理论模型.

1 试验

1.1 原材料

水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其化学成分(质量分数,本文涉及组成、含量等除特别说明外均为质量分数)如表1所示,主要矿物组成如表2所示.骨料为天然河砂和级配石灰石,河砂细度模数2.8,石灰石粒径范围5~25 mm.粉煤灰是由元宝山发电有限公司产的一级低钙灰.硅灰由三远硅材料公司生产,比表面积为 $2 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{kg}$.减水剂为聚羧酸系列高效减水剂,固含量为35%.

酸系列高效减水剂,固含量为35%.

表1 水泥的化学组成
Table 1 Chemical composition of cement

									w/%
SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Al ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	IL	
21.08	63.93	1.76	3.65	0.73	4.55	2.06	0.58	1.66	

表2 水泥的主要矿物组成
Table 2 Main mineral composition of cement

						w/%
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaSO ₄ ·0.5H ₂ O	
58.01	16.80	5.35	12.09	2.30	4.10	

1.2 配合比

为研究不同强度等级混凝土的表面失水特征,本文选取C30、C50和C80这3个强度等级混凝土为研究对象,材料用量见表3.为研究不同养护制度混凝土的表面干燥特征,本文对混凝土浇筑完成后未覆膜($t_0=0 \text{ d}$)和密封养护3 d($t_0=3 \text{ d}$)2种条件下的表面干燥特性和湿度发展历程进行试验研究.

表3 不同强度等级混凝土的配合比和抗压强度
Table 3 Mix proportions and compressive strength of different strength grade concretes

Grade	Mix proportion/(kg·m ⁻³)						Compressive strength at 28 d/MPa
	Cement	Sand	Stone	Water	Fly ash	Silica fume	
C30	240	750	1 150	186	60	0	37.9
C50	345	685	1 090	185	85	0	54.7
C80	450	580	1 140	150	0	50	82.1

1.3 试验方法

1.3.1 失水量在线测试

混凝土失水量的定量测试是研究其表面扩散特性和表面系数定量计算的基础.本文采用混凝土失水量在线监测试验,测试不同强度等级、不同养护条件混凝土在上表面干燥条件下失水量随时间的变化.试验采用内部尺寸为400 mm×100 mm×100 mm的有机玻璃模具,在试验开始前将塑料膜铺设于有机玻璃模具内侧,以实现混凝土上表面干燥而其他各面均密封的一维干燥试验条件.混凝土失水量测试

装置如图1所示.具体过程如下:首先,将混凝土拌合物分2次浇筑于有机玻璃模具中,并在振动台上振动密实;然后,将混凝土试件表面抹平,干燥试件($t_0=0 \text{ d}$)直接放置于试验装置上进行失水量测定,而覆膜养护试件($t_0=3 \text{ d}$)需覆膜养护3 d,再拆除上表面养护膜,放置于试验装置上进行失水量测定,直至28 d龄期.数据通过计算机进行实时记录.试验室内温度为 $(25 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度为30%.

1.3.2 混凝土表面湿度测试

混凝土干燥表面的湿度变化历程是其表面干燥

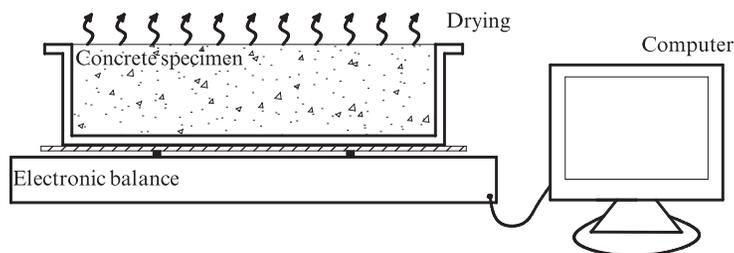


图1 混凝土失水量在线测试试验装置
Fig. 1 Test device for concrete water loss

特性的重要表征方式,也是准确计算 a_m 的重要基础数据.由于混凝土干燥面与环境之间的相对湿度过渡层较薄,传统的电容式或电阻式相对湿度传感器尺寸较大,无法准确测出混凝土干燥表面的相对湿度值.本文采用尺寸较小的光纤光栅湿度传感器,对混凝土干燥表面的湿度水平进行定量测试^[7].光纤光栅湿度传感器由光纤光栅和涂覆在其上的湿敏材料组成,如图2所示.本文设计了如图3所示的混凝土表面湿度测试装置,该装置由混凝土模具、光纤光栅湿度传感器和卡具3部分组成.其中光纤光栅湿度传感器通过卡具固定于有机玻璃模具上,使得湿度传

感器固定并接近混凝土的干燥表面.通过数据采集仪实时采集湿度数据,记录频率为1次/min.该传感器相对湿度测试范围为20%~95%,最大误差为1%.为保证相对湿度的测试精度,本文在湿度试验后,对光纤光栅湿度传感器进行标定,得到标定曲线,并根据标定曲线对测试得到的混凝土表面相对湿度数据进行修正.本文选取NaBr、NaCl、KCl、BaCl₂、K₂SO₄以及蒸馏水等6种过饱和盐溶液对传感器进行标定.图4为光纤光栅湿度传感器的标定结果,后文中所展示的湿度结果均为标定后的结果.

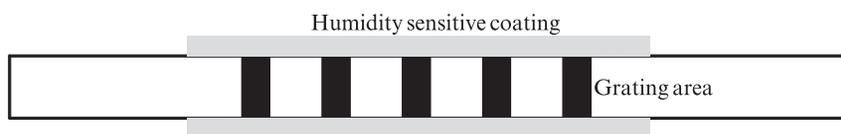


图2 光纤光栅湿度传感器示意图
Fig. 2 Schematic diagram of fiber Bragg grating humidity sensor

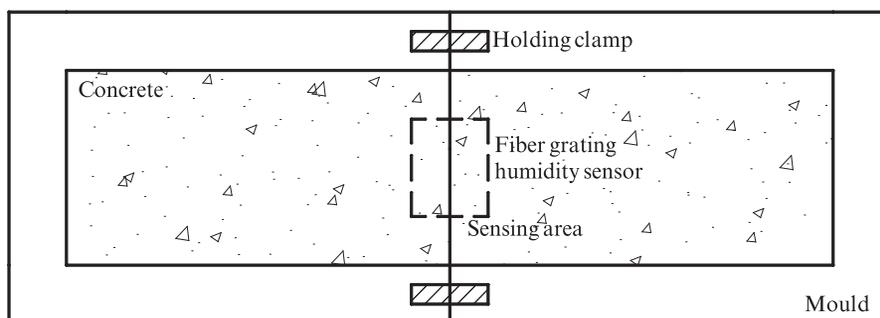


图3 混凝土表面湿度测试装置俯视图
Fig. 3 Top view of concrete surface humidity test device

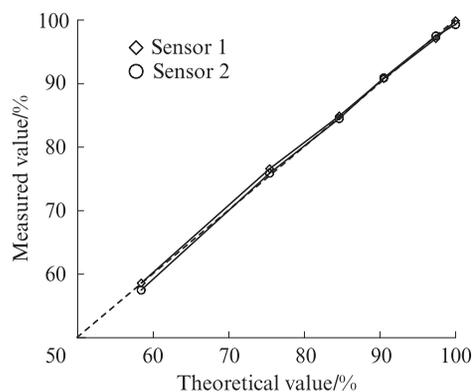


图4 光纤光栅湿度传感器的标定结果
Fig. 4 Calibration results of fiber Bragg grating humidity sensor

2 结果及分析

2.1 混凝土表面系数的理论推导

混凝土的干燥面直接与环境接触,由于混凝土

表面的湿度水平通常高于周围环境,因此混凝土表面水分将在湿度梯度的作用下扩散到周围环境中.该扩散过程可以用如下扩散方程进行描述^[8]:

$$J = -\frac{D_m MP_s}{RT} \frac{dH}{dx} \quad (1)$$

式中: J 为混凝土干燥面的失水速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; D_m 为水蒸气的扩散系数, m^2/s ; M 为水的摩尔质量, kg/mol ; P_s 为试验条件下水的饱和蒸气压, Pa ; R 为理想气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为环境温度, K ; H 为相对湿度.

由前文分析,混凝土的干燥表面存在过渡层,如图5所示.

假定过渡层厚度为 δ ,且相对湿度在过渡层内满足线性分布.则式(1)可变化为:

$$J = -\frac{D_m MP_s}{RT} \frac{H_e - H_1}{\delta} = a_m (H_1 - H_e) \quad (2)$$

式中: H_e 为环境湿度; H_1 为混凝土干燥表面湿度. a_m 可表示为:

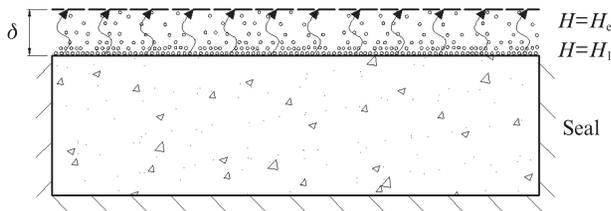


图5 混凝土干燥面与环境之间过渡区示意图
Fig. 5 Illustration of interface between drying surface and environment

$$a_m = \frac{D_m MP_s}{RT\delta} = \frac{J}{(H_1 - H_e)} \quad (3)$$

当混凝土表面处于湿度饱和期时,其表面相对湿度恒定为1($H_1=1$).此时由式(3)可以得到 a_m :

$$a_m = \frac{J}{1 - H_e} \quad (4)$$

由式(4)可知,只要在环境湿度恒定的条件下,通过试验得到混凝土湿度饱和期的失水速率 J ,即可采用式(4)计算得到混凝土湿度饱和阶段的表面系数.

当混凝土表面处于湿度下降期($H_1 < 1$)时,由式(3)可知, a_m 可以表示为:

$$a_m = \frac{J}{(H_1 - H_e)} \quad (5)$$

由式(5)可知,混凝土湿度下降阶段的表面系数 a_m 与失水速率 J 及干燥表面湿度 H_1 有关.因此,只要在环境湿度恒定的条件下,通过试验得到混凝土表

面湿度下降阶段的失水速率 J 和表面湿度 H_1 ,即可采用式(5),通过不断优化 a_m 的取值,拟合 H_1 的试验数据,即可计算得到混凝土湿度下降阶段的表面系数 a_m .由上述理论可知,通过试验测定恒定环境湿度条件下混凝土失水速率和表面湿度的变化历程,即可计算得到混凝土湿度饱和期与湿度下降期的表面系数 a_m .

2.2 混凝土失水量测试结果与分析

基于2.1分析,本节将对3个强度等级混凝土在不同养护制度下失水量随养护龄期的变化关系进行测定,并计算其失水速率随时间的变化.图6为3个强度等级混凝土在上表面干燥条件下失水量随养护龄期的变化.由图6可见:(1)各强度等级混凝土在干燥条件下的失水量均随龄期的延长而逐渐增加.在相同龄期时,高强度混凝土的总失水量小,低强度混凝土的总失水量大.混凝土失水量随养护龄期的变化遵循2阶段模式,在初始阶段,失水量线性增大;达到某一时刻后,失水量发展呈现非线性.其中,线性增大阶段与混凝土干燥面湿度的饱和期相对应,非线性阶段与混凝土干燥面湿度的下降期相对应.(2)当混凝土覆膜养护3d后进行表面干燥时,各强度等级混凝土失水量随时间变化的第1阶段持续时间显著减小,但不同养护时间下混凝土试件的第1阶段失水速率几乎相同.在相同干燥龄期下,密封养护混凝土试件的总失水量显著小于对应龄期的未覆膜养护试件.

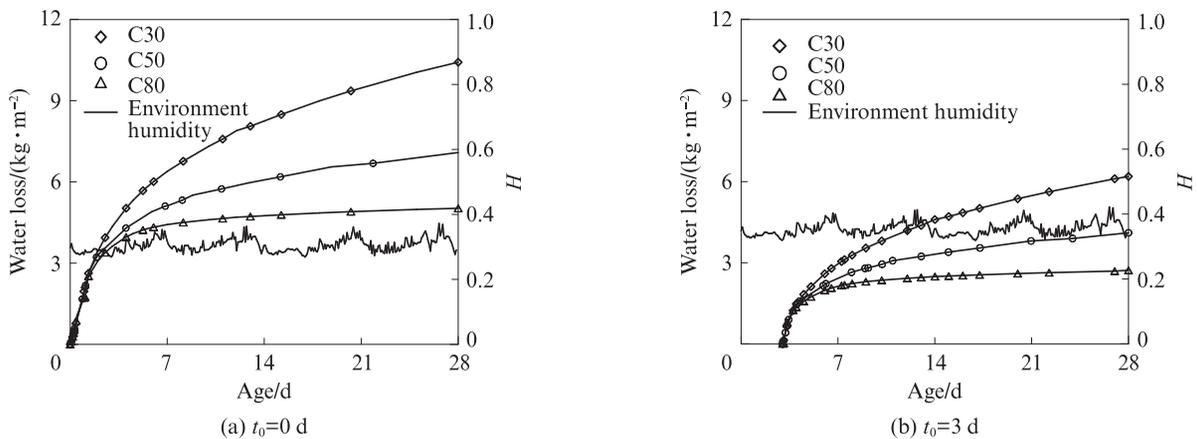


图6 3个强度等级混凝土在上表面干燥条件下失水量随养护龄期的变化
Fig. 6 Changes of water loss of three strength grades concrete with curing ages under top surface drying

为进一步求解不同强度等级混凝土的表面系数,将图6中的失水量数据对养护龄期求导,即可得到各强度等级混凝土的失水速率 J ,结果如图7所示.由图7可见:混凝土表面干燥条件下的失水速率随养护龄期的变化仍遵循2阶段模式,且不同强度

等级混凝土第1阶段的失水速率几乎相同.本文中混凝土第1阶段的失水速率约为 $2.60 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,该值与本文试验条件下自由水的蒸发速率相同;混凝土覆膜养护后,其失水速率变化的第1阶段持续时间显著缩短,但第1阶段失水速率绝对值

不因养护条件的变化而变化,均接近于试验条件下自由水的蒸发速率;覆膜养护后混凝土试件在相同干燥龄期时的表面失水速率均小于未覆膜养护试

件.将图7中各强度等级混凝土的第1阶段失水速率代入式(4)中,即可得到第1阶段表面系数,其值几乎为常数.

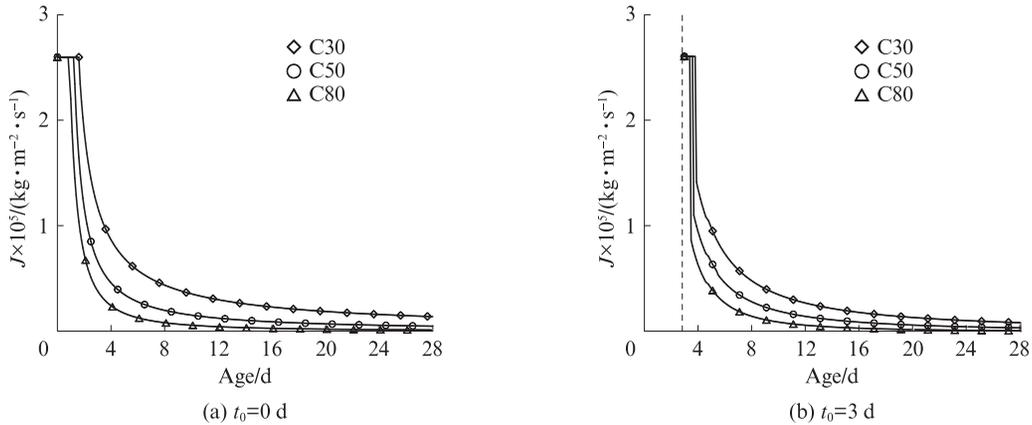


图7 不同养护制度条件下各强度等级混凝土的失水速率

Fig. 7 Water loss rate of concrete with different strength grades and curing conditions under surface drying

2.3 混凝土表面湿度测试结果与分析

为计算得到混凝土湿度下降阶段的表面系数,本

文采用光纤光栅湿度传感器对各强度等级混凝土湿度下降阶段的表面湿度进行测试,结果如图8所示.

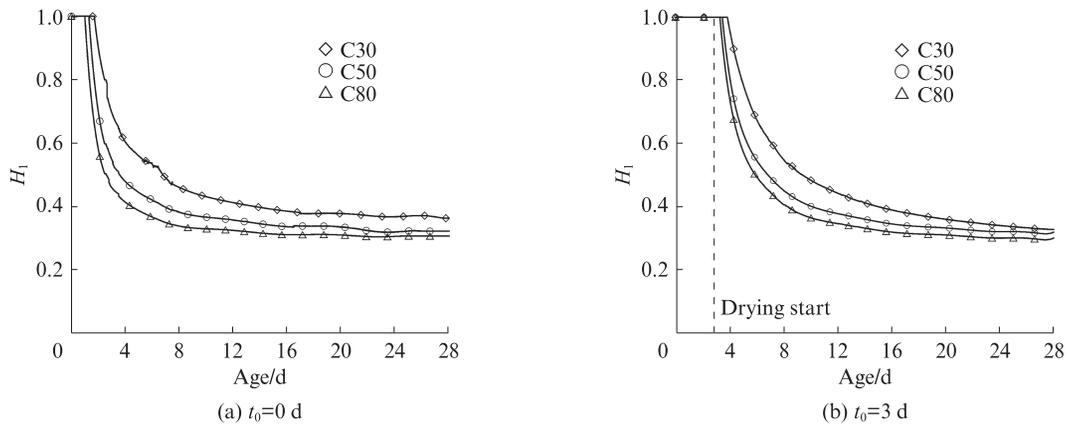


图8 不同养护制度条件下各强度等级混凝土的表面湿度

Fig. 8 Surface humidity of concrete with different strength grades and curing conditions under surface drying

对式(5)进行数学变换,可以得到混凝土表面湿度与表面系数之间的关系,如式(6)所示.

$$H_1 = \frac{J}{a_m} + H_e \tag{6}$$

基于试验测定的各强度等级混凝土表面湿度变化历程,通过不断优化式(6)中表面系数的取值,拟合混凝土湿度下降阶段的表面湿度数据,从而得到湿度下降阶段的表面系数,结果如表4所示.为方便对比,将混凝土第1阶段表面系数的计算结果也列于表中.

由表4可见:(1)各强度等级混凝土第1阶段(湿度饱和阶段)的表面系数几乎相同,且与养护制度、强度等级无关.第2阶段(湿度下降阶段)的表面系数

表4 不同强度等级混凝土2阶段的表面系数
Table 4 Two stage surface factor of different strength grade concretes

t_0/d	$\times 10^{-5} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^1)$					
	C30		C50		C80	
	Stage I	Stage II	Stage I	Stage II	Stage I	Stage II
0	3.708	2.578	3.713	2.356	3.710	1.848
3	3.711	2.180	3.708	1.670	3.711	1.226

均小于第1阶段的相应值,且受养护制度、强度等级的影响显著.(2)具体而言,随着混凝土强度等级的提高,其第2阶段表面系数逐渐减小.随着养护时间的延长,各强度等级混凝土覆膜养护后的第2阶段表面系数均有所减小.原因在于,混凝土刚刚浇筑完成

后,其表面处于湿度饱和状态.此时混凝土干燥表面被一层完整的水膜所覆盖,该阶段的表面系数与强度等级无关.随着干燥作用的不断进行,混凝土干燥面的水膜被逐渐消耗,直至其完整性被破坏.此时,混凝土干燥面的水分被分割为多个水岛,仅在表面毛细孔处存在孔隙水.即该阶段混凝土干燥面仅毛细孔中液体与环境之间发生水分交换,混凝土表面水分蒸发面积显著减小.因此,各强度等级混凝土湿度下降阶段(第2阶段)的表面系数均小于湿度饱和阶段(第1阶段).随着混凝土强度等级的提高,表面毛细孔的含量逐渐减少,其表面系数也逐渐减小.对于覆膜养护试件而言,覆膜养护阶段混凝土表面的水泥颗粒不断水化,使得表面孔隙数量和尺寸减少.因此,各强度等级混凝土覆膜养护试件的表面系数均显著小于未覆膜养护试件.

2.4 考虑孔结构特征的混凝土2阶段表面系数理论计算模型

由上述结果可知,混凝土的表面系数依据干燥面湿度状态不同可划分为2个阶段,其中第1阶段仅与同条件下自由水的蒸发速率有关,第2阶段与混凝土干燥表面的含水孔隙结构等因素相关.因此,本文在现有表面系数计算模型的基础上,引入面积参数 ψ_s :

$$a_m = \begin{cases} a_{m0}, H_1 = 1.0 \\ \psi_s a_{m0}, H_1 < 1.0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: a_{m0} 为混凝土湿度饱和阶段的表面系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; ψ_s 为面积参数,该参数与混凝土表面的初始孔结构和水化度等因素相关.当混凝土表面处于湿度饱和状态时,根据水分蒸发理论,文献[9]提出了该阶段表面系数的理论计算模型.对于湿度下降阶段而言,仍需考虑混凝土干燥表面面积参数 ψ_s 的影响.基于Powers的水泥水化产物及相关各相体积模型^[4],本文提出混凝土表面湿度下降阶段面积参数 ψ_s 的理论计算模型:

$$\psi_s = \frac{V_{cw}}{V_{cw0}} \psi_{s0} \quad (8)$$

式中: V_{cw} 为水化度为 α 时混凝土中水泥石毛细孔水的体积, m^3 ; V_{cw0} 为未覆膜养护试件表面湿度下降时水泥石毛细孔水的体积,可通过试验并结合理论计算得到; ψ_{s0} 为未覆膜养护试件湿度下降阶段的面积参数,可基于试验计算得到. V_{cw} 的理论计算公式如下所示:

$$V_{cw} = p - 1.3(1 - p)\alpha \quad (9)$$

式中: p 为水灰比的函数,计算公式如下所示:

$$p = \frac{m_w/m_c}{m_w/m_c + \rho_w/\rho_c} \quad (10)$$

式中: m_w 、 m_c 分别为配比中水和水泥的质量, g ; ρ_w 和 ρ_c 分别为水和水泥的密度, kg/m^3 .水泥的水化程度 α 可以参照文献[4]计算得到.采用上述计算模型,即可计算得到不同强度等级混凝土2阶段的表面系数,结果如表5所示.由表5可见,混凝土湿度饱和期和湿度下降期的表面系数试验值与模型计算值吻合良好,从而验证了所提出模型的可靠性.

表5 混凝土表面系数试验值与模型计算值的对比
Table 5 Comparison of test results and model results of concrete surface factor

Concrete	t_0/d	$\times 10^{-5} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$			
		Stage I		Stage II	
		Test result	Model result	Test result	Model result
C30	0	3.708	3.720	2.578	2.585
	3	3.711	3.720	2.180	2.191
C50	0	3.713	3.720	2.356	2.362
	3	3.708	3.720	1.670	1.684
C80	0	3.710	3.720	1.848	1.852
	3	3.711	3.720	1.226	1.212

3 结论

(1)混凝土的表面系数根据表面湿度状态不同可划分为2个阶段,且分别与湿度饱和期和湿度下降期相对应.

(2)当混凝土表面处于湿度饱和期时,其表面系数仅与环境因素有关;当处于湿度下降期时,其表面系数除与环境因素有关外,还与混凝土强度等级和水化程度有关.

(3)所提出的考虑水泥水化进程的表面系数2阶段计算模型,充分考虑了混凝土强度等级、水化历程等因素对表面干燥作用的影响,模型计算得到的不同水化程度混凝土表面系数与实测值吻合良好.

参考文献:

- [1] XI Y, BAZANT Z P, JENNINGS H. Moisture diffusion in cementitious materials-moisture capacity and diffusivity [J]. Advanced Cement Based Materials, 1994, 1(6):258-266.
- [2] REZVANI M, PROSKE T, GRAUBNER C A. Modelling the drying shrinkage of concrete made with limestone-rich cements [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 115:160-175.
- [3] 韩宇栋,张君,紫民,等.预湿陶砂对混凝土板早期湿度分布及发展的影响[J].建筑材料学报,2016,19(3):326-332.

- HAN Yudong, ZHANG Jun, ZI Min, et al. Influence of pre wetting ceramic sand on early moisture distribution and development of concrete slab[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(3):326-332. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] 丁小平, 张君, 韩宇栋, 等. 考虑内养护剂释水的混凝土自干燥计算模型[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(3):242-247.
- DING Xiaoping, ZHANG Jun, HAN Yudong, et al. A calculation model of concrete self-desiccation considering the water release of internal curing agent[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(3):242-247. (in Chinese)
- [6] UNO P J. Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95:365-375.
- [7] WANG H P, XIANG P, JIANG L Z. Optical fiber sensing technology for full-scale condition monitoring of pavement layers [J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21 (5) : 1258-1273.
- [8] BAKHSHI M, MOBASHER B, SORANAKOM C. Moisture loss characteristics of cement-based materials under early-age drying and shrinkage conditions[J]. Construction and Building Materials, 2012, 30:413-425.
- [9] ZHANG J, WANG J H, DING X P. Test and simulation on moisture flow in early age concrete under drying[J]. Drying Technology, 2018, 36(2):221-233.

(上接第 627 页)

- Investigation on the influence of sulfur dioxide to concrete performance[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(1):44-51. (in Chinese)
- [12] 牛建刚, 吴斌, 杨鹏飞. 二氧化硫条件下粉煤灰混凝土的腐蚀性能研究[J]. 混凝土, 2016(3):56-59.
- NIU Jiangang, WU Bin, YANG Pengfei. Influence of fly ash on the corrosion behavior of concrete in sulfur dioxide containing environments[J]. Concrete, 2016(3):56-59. (in Chinese)
- [13] 唐志永, 金保升, 仲兆平, 等. 电站烟囱混凝土 SO₂ 腐蚀模拟研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(增刊1):710-713.
- TANG Zhiyong, JIN Baosheng, ZHONG Zhaoping, et al. An experimental study on the accelerated corrosion of plant chimney in high SO₂ concentration[J]. Industrial Construction, 2005, 35 (Suppl 1):710-713. (in Chinese)
- [14] 莫斯克文 B M, 阿列克谢耶夫 C H, 伊万诺夫 Φ M, 等. 混凝土和钢筋混凝土的腐蚀及其防护方法[M]. 北京:化学工业出版社, 1988:239-241.
- MOSKEWEN B M, ALEKSEYEV C H, IVANOV Φ M, et al. Corrosion of concrete and reinforced concrete and its protection [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988: 239-241. (in Chinese)
- [15] 蔡洪良, 陈飞. 火电厂湿法烟气脱硫后烟囱防腐调研总结[J]. 武汉大学学报(工学版), 2012, 45(增刊1):234-238.
- CAI Hongliang, CHEN Fei. Summarization of corrosion protection research for chimneys with wet flue gas desulphurization [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2012, 45(Suppl 1):234-238. (in Chinese)
- [16] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京:科学出版社, 2003:14.
- NIU Ditao. Durability and life forecast in reinforced concrete structure [M]. Beijing: Science Press, 2003: 14. (in Chinese)