

文章编号:1007-9629(2022)03-0248-08

# 掺粉煤灰再生混凝土吸湿过程与预测模型研究

蒋建华\*, 吴琦, 付用全, 林明益, 眭源

(河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210024)

**摘要:**开展了再生粗骨料取代率、粉煤灰掺量和再生粗骨料初始含水率对再生混凝土吸湿过程影响的试验研究.结果表明:再生粗骨料取代率为 25% 的混凝土毛细吸水系数和湿度响应速率均为最小,取代率为 0%、50%、75%、100% 的混凝土毛细吸水系数和湿度响应速率依次增大;粉煤灰掺量为 10% 的混凝土毛细吸水系数和湿度响应速率均为最小,掺量为 0%、20%、30% 的混凝土毛细吸水系数和湿度响应速率依次增大;混凝土的毛细吸水系数和湿度响应速率均随再生粗骨料初始含水率的增大而增大;在湿度响应过程的早期,3 种影响因素对混凝土湿度响应的影响更大,随着湿度响应的进行,该影响逐渐减小,且随着粉煤灰掺量和再生粗骨料初始含水率的增大,不同时间段的混凝土湿度响应速率差距增大.基于混凝土传质过程的基本理论,利用试验数据计算出不同试验条件下再生混凝土的湿气扩散系数,进而建立了再生混凝土湿度响应的预测模型.

**关键词:**粉煤灰;再生混凝土;湿度响应;毛细吸水系数;湿气扩散系数;预测模型

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.03.005

## Moisture Absorption Process and Prediction Model of Recycled Concrete Mixed with Fly Ash

JIANG Jianhua\*, WU Qi, FU Yongquan, LIN Mingyi, SUI Yuan

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The effects of replacement ratio of recycled coarse aggregate (RCA), fly ash content and initial moisture content of RCA on the moisture absorption process of recycled concrete were studied by experiments. The results show that the capillary water absorption coefficient and humidity response rate of concrete with the 25% replacement rate of RCA are the smallest, and those of concrete with a replacement rate of 0%, 50%, 75%, 100% increase in above rate sequence. The capillary water absorption coefficient and humidity response rate of concrete with the fly ash content of 10% are the smallest, and those of concrete with the fly ash content of 0%, 20%, 30% also increase in above rate sequence. The capillary water absorption coefficient and humidity response rate of concrete increase with the increase of initial moisture content of RCA. In the early stage of the humidity response, the three influencing factors have a greater effect on the concrete humidity response. As the humidity response progresses, the effect gradually decreases. And with the increase of fly ash content and initial moisture content, the difference in the humidity response rate of concrete in different periods increases. Finally, based on the basic theory of the mass transfer in concrete, the moisture diffusion coefficient of recycled concrete under different test conditions is calculated by using the experimental data. Then, the prediction model of the humidity response of recycled concrete is established.

**Key words:** fly ash; recycled concrete; humidity response; capillary water absorption coefficient; moisture diffusion coefficient; prediction model

收稿日期:2020-11-12; 修订日期:2020-12-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408192);河海大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200202232)

第一作者(通讯作者):蒋建华(1982—),男,重庆人,河海大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:jjhzhxh@hhu.edu.cn

再生混凝土技术将废旧混凝土进行二次利用,有利于维护生态环境的平衡和社会的可持续发展。但现有研究表明再生混凝土的耐久性往往低于天然混凝土,如何改善再生混凝土的耐久性能已成为学术界关注的热点<sup>[1-3]</sup>。

混凝土内部湿度环境是影响混凝土耐久性能的主要因素之一<sup>[4-6]</sup>。混凝土内部的含湿状态很大程度上取决于对外部气候环境的响应。Zhang等<sup>[7]</sup>和Min等<sup>[8]</sup>研究了人工恒定气候环境下荷载损伤普通混凝土的内部湿度响应规律。Andrade等<sup>[9]</sup>和王卫仑等<sup>[10]</sup>开展了自然气候环境下普通混凝土的内部湿度响应规律研究。Liu等<sup>[11-12]</sup>研究了不同温度及荷载条件下再生混凝土的内部湿度响应规律和机理。由此可见,目前关于混凝土内部湿度响应的研究主要集中于普通混凝土,再生混凝土湿度响应的研究还有待进一步完善。

本文在前期研究成果<sup>[13]</sup>的基础上,基于恒定气候环境条件的吸水试验和湿度响应试验,进一步研究了考虑再生粗骨料取代率、粉煤灰掺量和再生粗骨料初始含水率3种影响因素对混凝土内部湿度响应的影响,并进行了模型预测,以期为后续再生混凝土结构的耐久性定量分析提供理论基础。

## 1 试验

### 1.1 原材料与试件设计

水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥;粉煤灰(FA)为Ⅱ级F类粉煤灰;细骨料为河砂(中砂),细度模数为2.7;天然粗骨料(NCA)为粒径5~15 mm的碎石;再生粗骨料(RCA)产自南京富源资源利用有限公司,粒径范围为5~15 mm;拌和水为普通自来水;减水剂(WR)为聚羧酸系液态减水剂。立方体试件尺寸为100 mm×100 mm×100 mm,其水胶比为0.40(质量比,文中涉及的水胶比、含水率等均为质量比或质量分数)。本文设计3组试验工况:(1)固定粉煤灰掺量 $\rho_F$ 为20%、再生粗骨料初始含水率 $\omega_R$ 为4.50%,考虑不同再生粗骨料取代率 $\rho_R$ (0%、25%、50%、75%、100%)的影响;(2)固定 $\rho_R$ 为100%、 $\omega_R$ 为4.50%,考虑不同 $\rho_F$ (0%、10%、20%、30%)的影响;(3)固定 $\rho_R$ 为100%、 $\rho_F$ 为20%,考虑不同 $\omega_R$ (0%、3.56%、5.76%、7.83%)的影响。混凝土试件配合比如表1所示。

### 1.2 试件制作与养护

本文采用PVC管预留孔洞埋置湿度传感器来测量混凝土的内部相对湿度。浇筑混凝土时,为避免水

表1 混凝土试件配合比  
Table 1 Mix proportions of concrete specimens

Group	Water	Cement	FA	Sand	NCA	RCA	WR	kg/m <sup>3</sup>
R0	180.00	360.00	90.00	655.00	1 165.00	0	1.80	
R25	166.89	360.00	90.00	655.00	874.70	291.30	1.80	
R50	153.79	360.00	90.00	655.00	582.50	582.50	1.80	
R75	140.68	360.00	90.00	655.00	291.30	874.70	1.80	
R100	127.58	360.00	90.00	655.00	0	1 165.00	1.80	
F0	127.58	450.00	0	655.00	0	1 165.00	1.80	
F10	127.58	405.00	45.00	655.00	0	1 165.00	1.80	
F20	127.58	360.00	90.00	655.00	0	1 165.00	1.80	
F30	127.58	315.00	135.00	655.00	0	1 165.00	1.80	
W0	180.00	360.00	90.00	655.00	0	1 165.00	1.80	
W3.56	138.53	360.00	90.00	655.00	0	1 165.00	1.80	
W5.76	112.90	360.00	90.00	655.00	0	1 165.00	1.80	
W7.83	88.78	360.00	90.00	655.00	0	1 165.00	1.80	

泥浆渗入管内,预先将尼龙棒插入PVC管中。试件制作前,为使再生粗骨料具有一定梯度的初始含水率,先将再生粗骨料于105℃下烘干24 h,再满水浸泡12 h;然后将粗骨料分为4组,再次进行烘干处理,每组烘干时间分别为0、1、3、5 h;最后静置至室温后称重,计算得到4组再生粗骨料的含水率,分别为0%、3.56%、5.76%、7.83%。考虑到4组再生粗骨料初始含水率的不同,为保持试件水胶比一定,混凝土搅拌时减少相应拌和水的用量。

吸水试件采用普通塑料模具进行浇筑;湿度响应试件采用侧面开孔的木模具进行浇筑。试件浇筑24 h后拆模,然后在标准养护条件((20±2)℃,相对湿度95%以上)下养护28 d,最后在室内静置60 d,待水泥充分水化。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 吸水试验

混凝土的吸水特性与材料自身的孔隙结构及分布密切相关。为便于分析相关因素对混凝土内部湿气传输的影响机理,本文先开展混凝土的吸水试验。试验前,为模拟混凝土试件处于完全干燥状态,先将试件置于105℃的电热恒温干燥箱中进行干燥处理,每隔24 h记录1次试件的质量变化,当连续2次的质量差小于1 g时,视为试件完全干燥,将试件此时的质量记为 $m_0$ 。试件干燥完成后,在相同工况下选取2个试件进行吸水试验,取吸水量的平均值作为代表值。试验装置采用设有固定圆柱体支架的水箱,为保证试件暴露面与水能够充分接触,控制水面高于混凝土暴露面3 mm左右,水温为(20±2)℃,混凝土吸水试验示意图如图1所示。为反映试件早期吸水特

性,在试验初期的7 h内每隔1 h称重1次;随后每隔24 h称重1次,连续测量10次,共17次;试件质量记为  $m_i$ ,质量差即吸水量  $\Delta m_i = m_i - m_0$  ( $1 h < i \leq 240 h$ ).

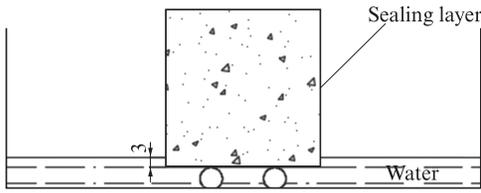


图1 混凝土吸水性试验示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of water absorption test of concrete(size:mm)

### 1.3.2 湿度响应试验

湿度响应试验前,为控制试件的初始相对湿度,同样先将试件置于105℃的干燥箱中烘干处理;然后置于恒定温湿度环境中,采用温湿度传感器监测混凝土内部温湿度条件;最终使混凝土内部的初始相对湿度在试验温度下达到(50±3)%.试件干燥完成后,拔出PVC管中的尼龙棒,插入湿度探头(测量范围0%~100%,测量精度±(2~3)%,分辨率0.1%),先用带槽口的橡皮塞密封PVC管口,再用生料带和铝箔胶带进行密封;为模拟一维吸水和湿度响应过程,将试件除暴露面外的其余5个面用铝箔胶带密封;最后将湿度探头与记录仪连接,如图2所示.试件处理完成后,将其置于恒温恒湿箱中进行湿度响应试验.模拟混凝土试件吸湿过程的湿度响应条件为:试件初始相对湿度  $H_0 = 50\%$ ,环境相对湿度  $H_e =$

90%,环境温度  $T = 25^\circ\text{C}$ .湿度记录仪设置为每隔6 h记录1次,记录时长30 d.

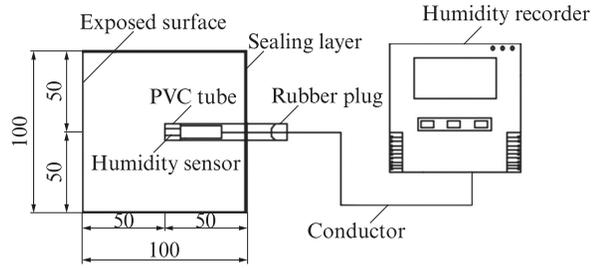


图2 混凝土湿度响应试验示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of humidity response test of concrete (size:mm)

## 2 吸水试验结果与分析

### 2.1 吸水量的时变规律

在水胶比为0.40的条件下,分别研究再生粗骨料取代率( $\rho_R$ )、粉煤灰掺量( $\rho_F$ )及再生粗骨料初始含水率( $\omega_R$ )对混凝土吸水量的影响.3种影响因素下混凝土的吸水量时变曲线如图3所示.由图3可知:3种影响因素下混凝土早期吸水量均增长较快,随着吸水时间( $t_w$ )的延长,混凝土的吸水量增速逐渐减慢,最终趋向稳定;当吸水时间( $t_w$ )一定时, $\rho_R$ 为25%的混凝土吸水量最小, $\rho_R$ 为0%、50%、75%和100%的混凝土吸水量依次增大; $\rho_F$ 为10%的混凝土吸水量最小, $\rho_F$ 为0%、20%和30%的混凝土吸水量依次增大;随着 $\omega_R$ 的增大,混凝土的吸水量逐渐增大.

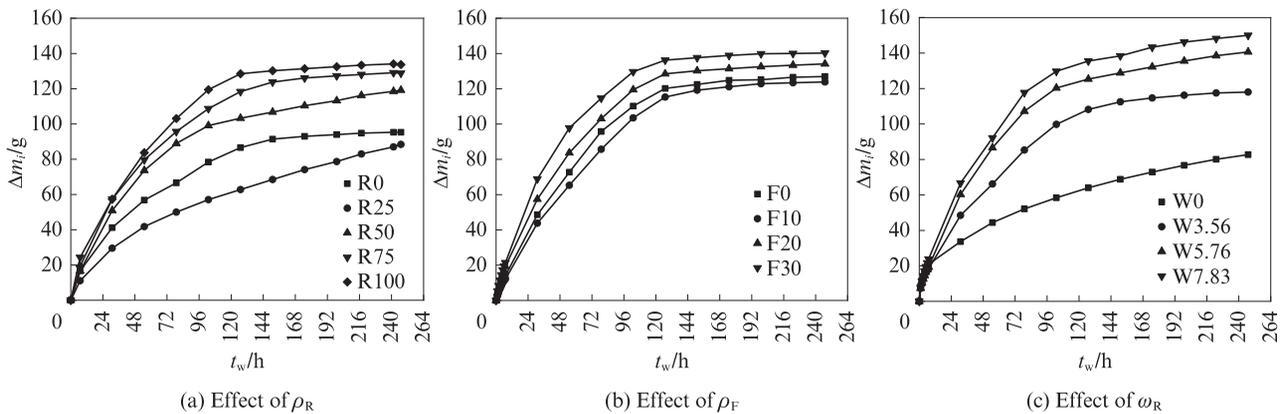


图3 混凝土吸水量时变曲线  
Fig. 3 Time-dependent curves of water absorption of concrete

### 2.2 毛细吸水系数

图4为混凝土单位面积( $A$ )吸水量( $\Delta m_i/A$ )与吸水时间( $t_w$ )平方根的关系曲线.根据该关系曲线,进一步研究3种影响因素对混凝土毛细吸水系数( $S, \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0.5})$ )的影响.混凝土吸水量与其毛细吸

水系数的关系式如(1)所示<sup>[14]</sup>.

$$\frac{\Delta m_i}{A} = S \sqrt{t_w} \tag{1}$$

由式(1)可知,混凝土单位面积吸水量与吸水时间的平方根之比即为混凝土毛细吸水系数.在实际

混凝土吸水过程中,毛细吸水系数随吸水时间而变化.为定量分析混凝土的吸水特性,将毛细吸水系数视为常数,根据式(1),由两者关系曲线(图4)前期线性段的斜率即可得到混凝土的毛细吸水系数,结果如图5所示.

由图5(a)可知:(1)随着 $\rho_R$ 的增大,混凝土的毛细吸水系数先减小后增大.(2)当 $\rho_R$ 小于25%时,混

凝土的毛细吸水系数随着 $\rho_R$ 的增大而减小;当 $\rho_R$ 大于25%后,混凝土的毛细吸水系数随着 $\rho_R$ 的增大而增大.(3) $\rho_R$ 为0%、50%、75%和100%的混凝土毛细吸水系数较 $\rho_R$ 为25%时分别增大了28.4%、44.8%、46.9%和52.9%.这说明 $\rho_R$ 为25%的混凝土微观结构最为致密,而 $\rho_R$ 为0%、50%、75%和100%的混凝土内部孔隙依次增大.

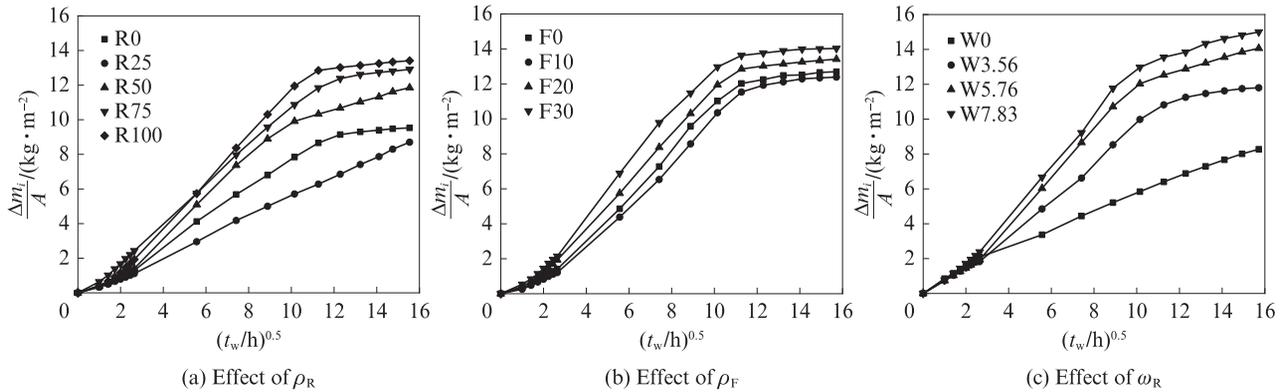


图4 混凝土单位面积吸水量与吸水时间平方根的关系曲线  
Fig. 4 Curves of water absorption per unit area vs square root of time of concrete

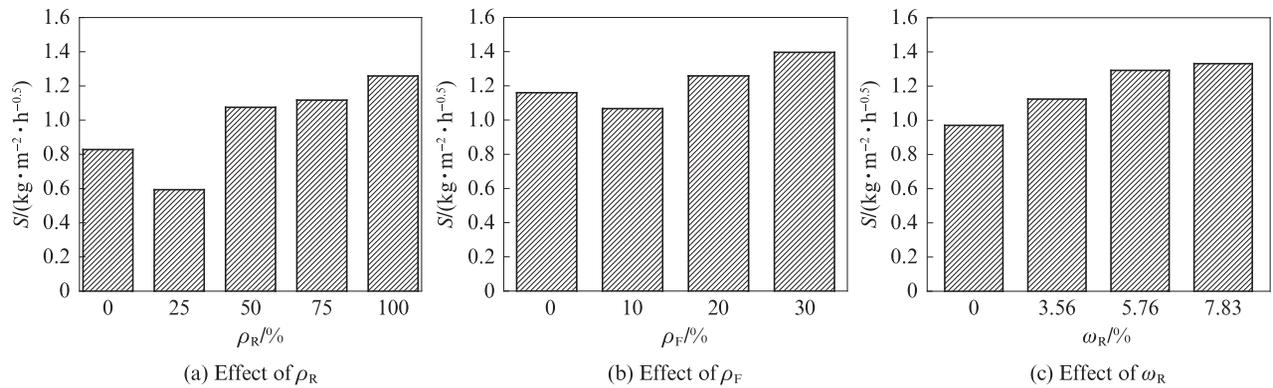


图5 混凝土的毛细吸水系数  
Fig. 5 Capillary water absorption coefficient of concrete

由图5(b)可知:(1)随着 $\rho_F$ 的增大,混凝土的毛细吸水系数先减小后增大.(2)当 $\rho_F$ 小于10%时,混凝土的毛细吸水系数随着 $\rho_F$ 的增大而略有降低;当 $\rho_F$ 大于10%时,混凝土的毛细吸水系数随着 $\rho_F$ 的增大而显著增大.(3) $\rho_F$ 为0%、20%和30%的混凝土毛细吸水系数较 $\rho_F$ 为10%时分别增大了8.0%、15.2%和23.6%.这说明 $\rho_F$ 为10%的混凝土微观结构最为致密, $\rho_F$ 为0%、20%和30%的混凝土孔隙率依次增大.

由图5(c)可知:(1)随着 $\omega_R$ 的增大,混凝土的毛细吸水系数逐渐增大.(2) $\omega_R$ 为3.56%、5.76%和7.83%的混凝土毛细吸水系数较 $\omega_R$ 为0%时分别增大了13.7%、24.9%和27.1%.这说明混凝土的孔隙率随着 $\omega_R$ 的增大而增大.

### 3 湿度响应试验结果与分析

#### 3.1 相对湿度的时变规律

在水胶比为0.40的条件下,分别研究再生粗骨料取代率( $\rho_R$ )、粉煤灰掺量( $\rho_F$ )及再生粗骨料初始含水率( $\omega_R$ )对混凝土湿度响应的影响.同种工况下选取2个试件湿度响应试验值的平均值作为代表值.混凝土内部相对湿度( $H$ )响应曲线如图6所示.由图6可知:(1)3种影响因素下混凝土内部相对湿度均严重滞后于环境相对湿度( $H_e=90%$ ),且混凝土内部相对湿度增长速率均随试验的进行逐渐下降.(2)当湿度响应时间( $t$ )一定时, $\rho_R$ 为25%的混凝土内部相对湿度值最小, $\rho_R$ 为0%、50%、75%和100%的混凝土

土内部相对湿度依次增大; $\rho_F$ 为10%的混凝土内部相对湿度最低, $\rho_F$ 为0%、20%和30%的混凝土内部相对湿度依次增大;混凝土内部相对湿度随 $\omega_R$ 的增大而增大。

### 3.2 湿度响应速率

为进一步定量分析3种因素对粉煤灰再生混凝土湿度响应的影响,定义湿度响应速率 $\Delta v = \Delta H / t$ 。 $\Delta H$ 为 $t$ 时间内混凝土内部相对湿度变化量。3种影响因素下混凝土湿度响应速率曲线如图7所示。

由图7(a)可知:(1)混凝土的湿度响应速率随着 $\rho_R$ 的增大呈先减小后增大的趋势。(2)当 $\rho_R$ 小于25%时,混凝土湿度响应速率随 $\rho_R$ 增大而减小;当 $\rho_R$ 大于

25%时,混凝土湿度响应速率随 $\rho_R$ 的增大而增大。这是因为 $\rho_R$ 较小时,再生粗骨料吸取部分拌和水,导致混凝土实际水胶比降低,混凝土内部结构变得致密;但是随着 $\rho_R$ 的增大,其吸水量显著增大,影响水泥的水化进程;同时 $\rho_R$ 的增大也会使混凝土内部原始损伤增大,导致混凝土内部孔隙率增大。湿度响应进行至5 d时, $\rho_R$ 为0%、50%、75%和100%的混凝土试件较 $\rho_R$ 为25%时分别增大了36.1%、80.6%、77.8%和94.4%;第30 d时,分别增大7.6%、19.1%、41.8%和63.5%。由此可见,湿度响应的早期,再生粗骨料取代率对混凝土湿度响应的影响较大;随着湿度响应的进行,影响逐渐减小。

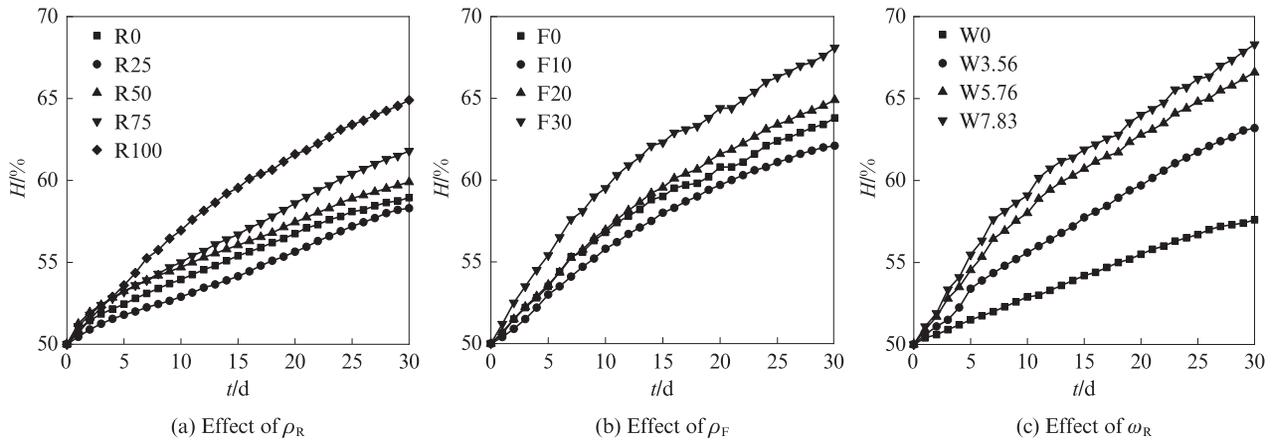


图6 混凝土内部湿度响应曲线  
Fig. 6 Humidity response curves inside concrete

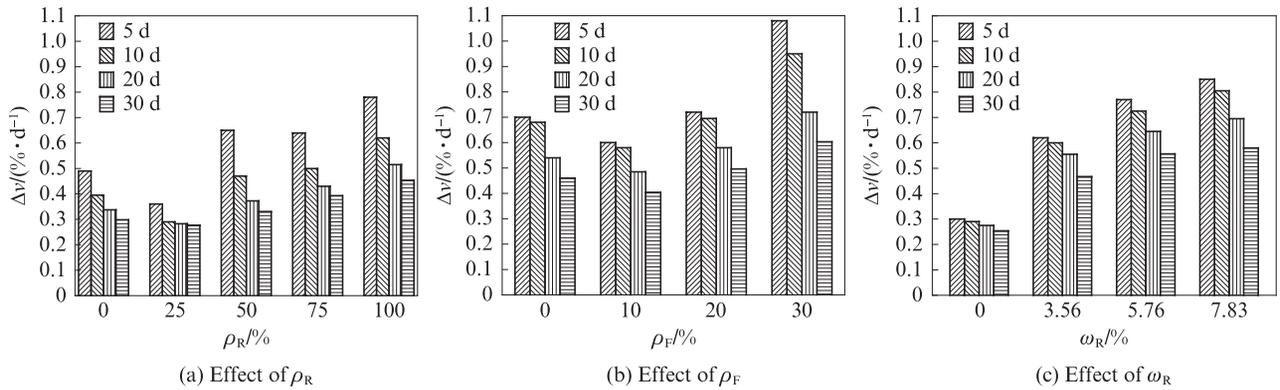


图7 混凝土湿度响应速率曲线  
Fig. 7 Moisture response rate of concrete

由图7(b)可知:(1)随着 $\rho_F$ 的增大,再生混凝土的湿度响应速率先减小后增大。(2)当 $\rho_F$ 小于10%时,再生混凝土湿度响应速率随 $\rho_F$ 的增大而减小;当 $\rho_F$ 大于10%后,湿度响应速率随 $\rho_F$ 的增大而增大。这主要因为粉煤灰作为活性掺和料可与水泥的水化产物 $Ca(OH)_2$ 进行二次水化,所生成的凝胶物质填充孔隙,使混凝土内部孔隙更为致密。10%的粉煤灰掺

量会改善再生混凝土内部孔隙状态,延缓外界湿气渗入速率;当粉煤灰掺量超过10%后,粉煤灰等量取代水泥过多,使得混凝土中水化产物减少,混凝土平均孔径增加<sup>[15]</sup>。(3)当湿度响应进行至第5 d时, $\rho_F$ 为0%、20%和30%的混凝土试件较 $\rho_F$ 为10%时分别增大了16.7%、20.0%和80.0%;第30 d时,分别增大15.0%、25.0%和50.0%。分析以上数据可知,在湿度

响应的早期,粉煤灰掺量对混凝土湿度响应速率影响较大;且粉煤灰掺量越大,不同时间段的湿度响应速率差异越明显。

由图7(c)可知:(1)再生混凝土的湿度响应速率随着 $\omega_R$ 的增大而增大。一方面,这是因为再生粗骨料中的孔隙水在混凝土振捣过程中易析出,未及时水化的水分在骨料周边形成小水囊,影响混凝土的致密性;另一方面,由吸水性试验可知,随着 $\omega_R$ 的增大,混凝土内部的孔隙结构逐渐变差,孔隙率逐渐增大。(2)湿度响应进行至第5 d时, $\omega_R$ 为3.56%、5.76%和7.83%的混凝土试件湿度响应速率较 $\omega_R$ 为0%的试件分别增大了106.7%、143.3%和166.7%;第30 d时,分别增大79.8%、100.0%和113.2%。由此表明,在湿度响应的早期, $\omega_R$ 对混凝土湿度响应速率的影响较大;且随着 $\omega_R$ 的增加,不同时间段的混凝土湿度响应速率差距增大。

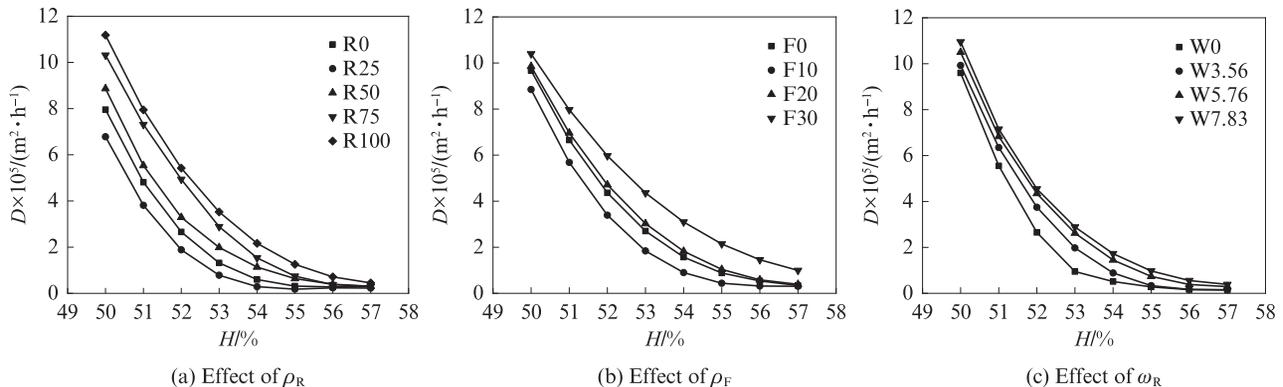


图8 混凝土湿气扩散系数演变规律

Fig. 8 Evolution law of moisture diffusion coefficient of concrete

由图8可知,随着混凝土内部相对湿度的增加,3种影响因素下混凝土的湿气扩散系数( $D$ )均逐渐减小。这是由于混凝土湿气传输的驱动力是混凝土内外湿度梯度,混凝土内部相对湿度增大,导致混凝土内外湿度梯度减小。混凝土内部相对湿度相同时,3种工况下的湿气扩散系数表现为: $\rho_R$ 为25%的混凝土 $D$ 值最小, $\rho_R$ 为0%、50%、75%和100%的 $D$ 值依次增大; $\rho_F$ 为10%的混凝土的 $D$ 值最小, $\rho_F$ 为0%、20%和30%的 $D$ 值依次增大;混凝土的 $D$ 值随着 $\omega_R$ 的增大而增大。

## 4.2 再生混凝土相对湿度响应预测模型

### 4.2.1 相对湿度响应理论模型

混凝土内的传质过程由Fick第二定律决定。根据Fick第二定律可获得混凝土内部任意时间、任意位置的相对湿度 $H(x,t)$ ,其表达式如式(3)所示<sup>[13]</sup>。

## 4 粉煤灰再生混凝土湿度响应预测模型

### 4.1 表层混凝土湿气扩散系数

混凝土湿度响应试验结果表明,混凝土内部相对湿度随响应时间而变化,即混凝土内湿度传输可以归为非稳态扩散问题。于是,根据变值扩散系数情形下的扩散方程,得到混凝土湿气扩散系数( $D$ )的计算表达式<sup>[13]</sup>:

$$D = -\frac{1}{2} \cdot \frac{d\eta}{dH} \int_{H_0}^{H_t} \eta dH \quad (2)$$

式中: $\eta$ 称为 Boltzmann 变量( $\eta = xt^{-0.5}$ ),当混凝土内部深度 $x$ 一定时,其为时间 $t$ 的函数; $H_t$ 代表响应时刻末混凝土内部相对湿度, %。

根据式(2)计算得到3种影响因素下的再生混凝土湿气扩散系数随相对湿度的变化规律,如图8所示。

$$H(x,t) = H_e - (H_e - H_0) \cdot \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{\bar{D} \cdot t}} \right) \quad (3)$$

式中: $\bar{D}$ 为混凝土的等效湿气扩散系数, $\text{m}^2/\text{h}$ 。

由式(3)可以看出,混凝土的等效湿气扩散系数对混凝土内部相对湿度响应的过程具有决定性的作用。因此,为确定再生混凝土内部相对湿度响应预测模型,应首先建立再生混凝土等效湿气扩散系数的计算模型。

### 4.2.2 再生混凝土等效湿气系数的计算模型

根据传质的相关理论,在同一个传质系统中,扩散系数和扩散时间的乘积为常数<sup>[13]</sup>。在混凝土湿度响应时间 $(0,t)$ 内,对该时间段内的湿气扩散系数进行积分,并取平均值,即可得到等效湿度扩散系数,如式(4)所示。

$$\bar{D} = \frac{1}{t} \int_0^t D dt \quad (4)$$

利用式(4)及混凝土湿气扩散系数数据,计算得到不同再生骨料取代率、不同粉煤灰掺量和不同再生骨料初始含水率混凝土的等效湿气扩散系数,结

果如图9所示。

根据上述计算结果,将 $\rho_R$ 、 $\rho_F$ 和 $\omega_R$ 作为影响混凝土湿气扩散系数的重要因素进行数值拟合,得到再生混凝土等效湿气扩散系数的预测模型公式,如式(5)所示。

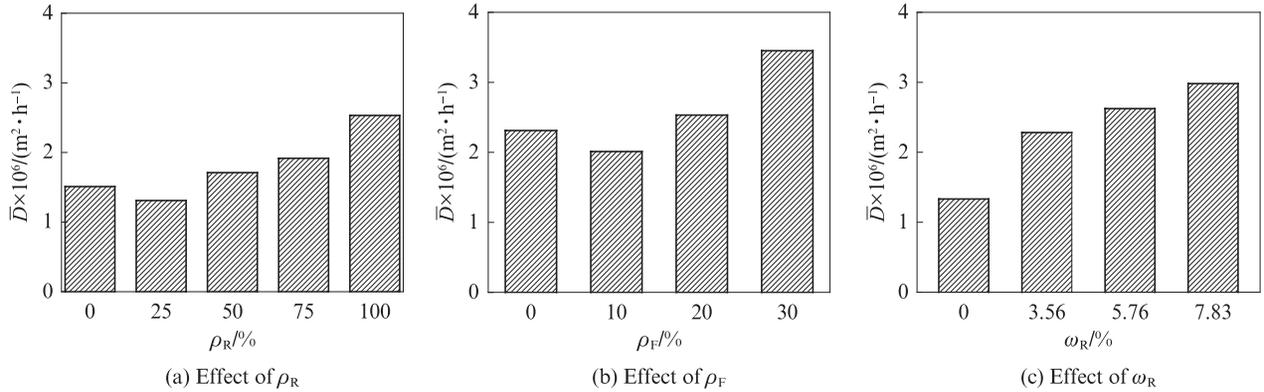


图9 混凝土等效湿气扩散系数

Fig. 9 Equivalent moisture diffusion coefficient of concrete

$$\bar{D} = \exp(0.685\rho_R + 1.583\rho_F + 7.916\omega_R - 14.269), (0 \leq \rho_R \leq 100\%, 0 \leq \rho_F \leq 30\%, 0 \leq \omega_R \leq 7.83\%) \quad (5)$$

#### 4.2.3 湿度响应模型的验证

在混凝土内部相对湿度响应预测模型的验证过程中,式(3)中误差函数的计算可选用双曲正切函数的近似算法<sup>[13]</sup>,如式(6)所示。

$$\operatorname{erf}(\varphi) = \tanh(1.128384\varphi + 0.10277\varphi^3) \quad (6)$$

式中: $\varphi = x/(2\sqrt{\bar{D} \cdot t})$ 。

以湿度响应过程R75工况为例,介绍混凝土内部相对湿度的计算过程。混凝土水胶比为0.40,距混凝土表面深度 $x=0.05$  m,混凝土内部实际初始相对湿度 $H_0=50\%$ ,外界环境实际相对湿度 $H_e=90\%$ ,环境温度 $T=25$  °C,具体计算过程如下。

(1)首先,利用再生混凝土等效湿气扩散系数的预测模型(式(5))计算R75的等效湿气扩散系数,其中 $\rho_R=75\%$ 、 $\rho_F=20\%$ 、 $\omega_R=4.5\%$ 。

$$\bar{D} = \exp(0.685 \times 0.75 + 1.583 \times 0.20 + 7.916 \times 0.045 - 14.269) = 2.081 \times 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{h)}$$

(2)然后,根据 $\varphi = x/(2\sqrt{\bar{D} \cdot t})$ 计算出不同时刻的 $\varphi$ ,将 $\varphi$ 代入式(6)中,得到不同时刻的误差函数值。

(3)最后,将 $x=0.05$  m、 $H_0=50\%$ 、 $H_e=90\%$ ,以及不同时刻的误差函数值代入式(3),得到不同时刻的混凝土内部相对湿度的计算值。

将R75工况的湿度响应试验值与计算值进行对比,如图10所示。由图10可知,以等效湿气扩散系数的计算模型为基础,采用双曲正切函数的近似算法计算误差函数,计算得到的再生混凝土内部相对湿

度计算值与试验值的最大误差为4.65%,误差小于5%,表明计算结果与试验结果吻合较好,本文提出的再生混凝土相对湿度响应预测模型可行。

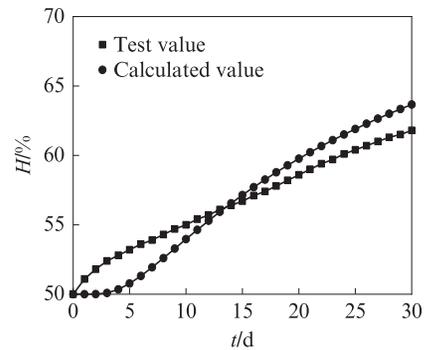


图10 混凝土湿度响应试验值与计算值的对比(R75)

Fig. 10 Comparison of test values and calculated values for humidity response (R75)

## 5 结论

(1)再生粗骨料取代率为25%的混凝土毛细吸水系数最小,取代率为0%、50%、75%、100%的混凝土毛细吸水系数依次增大;粉煤灰掺量为10%的混凝土毛细吸水系数最小,掺量为0%、20%、30%的混凝土毛细吸水系数依次增大;混凝土的毛细吸水系数随再生粗骨料初始含水率增大而增大。

(2)混凝土的湿度响应严重滞后于环境湿度,上述3种影响因素对再生混凝土湿度响应速率的影响规律与毛细吸水系数一致。

(3)建立了考虑3种影响因素的再生混凝土等效湿气扩散系数的计算模型,提出了再生混凝土内部相对湿度响应预测方法。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 张卫东,董云,彭宁波,等.冻融循环下透水再生混凝土力学性能损伤分析[J].建筑材料学报,2020,23(2):292-296.  
ZHANG Weidong, DONG Yun, PENG Ningbo, et al. Analysis on mechanical properties of pervious recycled concrete by damage under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):292-296. (in Chinese)
- [ 2 ] 侯永利,郑刚.再生骨料混凝土不同龄期的力学性能[J].建筑材料学报,2013,16(4):683-687.  
HOU Yongli, ZHENG Gang. Mechanical properties of recycled aggregate concrete in different ages [J]. Journal of Building Materials, 2013, 16 (4):683-687. (in Chinese)
- [ 3 ] 申健,牛荻涛,王艳,等.再生混凝土耐久性性能研究进展[J].材料导报,2016,30(3):89-94.  
SHEN Jian, NIU Ditao, WANG Yan, et al. Durability research status of recycled aggregate concrete[J]. Materials Guide, 2016, 30(3):89-94. (in Chinese)
- [ 4 ] SUN C, YUAN L, ZHAI X, et al. Numerical and experimental study of moisture and chloride transport in unsaturated concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 189:1067-1075.
- [ 5 ] PAUL S C, PANDA B, HUANG Y, et al. An empirical model design for evaluation and estimation of carbonation depth in concrete[J]. Measurement, 2018, 124:205-210.
- [ 6 ] WANG W, LU C. Time-varying law of rebar corrosion rate in fly ash concrete[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 360:520-528.
- [ 7 ] ZHANG W, MIN H, GU X. Temperature response and moisture transport in damaged concrete under an atmospheric environment [J]. Construction and Building Materials, 2016, 123:290-299.
- [ 8 ] MIN H, ZHANG W, GU X. Effects of load damage on moisture transport and relative humidity response in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2018, 169:59-68.
- [ 9 ] ANDRADE C, SARRIA J, ALONSO C. Relative humidity in the interior of concrete exposed to natural and artificial weathering [J]. Cement and Concrete Research, 1999, 29(8):1249-1259.
- [ 10 ] 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.  
WANG Weilun, LIU Peng, XING Feng. Change of natural environment humidity and response of humidity in concrete [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(12):5109-5116. (in Chinese)
- [ 11 ] LIU C, LIU H W, XIAO J Z, et al. Effect of old mortar pore structure on relative humidity response of recycled aggregate concrete[J] Construction and Building Materials, 2020, 247:118600.
- [ 12 ] LIU C, LIU H W, ZHU C, et al. On the mechanism of internal temperature and humidity response of recycled aggregate concrete based on the recycled aggregate porous interface[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 103:22-35.
- [ 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.  
JIANG Jianhua, YUAN Yingshu, WANG Songlin, et al. Prediction of response of relative humidity in concrete under artificial climate environment [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(12):5091-5099. (in Chinese)
- [ 14 ] ZHAO H T, DING J, HUANG Y Y, et al. Experimental analysis on the relationship between pore structure and capillary water absorption characteristics of cement-based materials[J]. Structural Concrete, 2019, 20(5):1750-1762.
- [ 15 ] 鲁彩凤,袁迎曙,蒋建华.粉煤灰混凝土孔隙结构对气体扩散能力的影响[J].中国矿业大学学报,2011,40(4):523-529.  
LU Caifeng, YUAN Yingshu, JIANG Jianhua. Effect of pore structure on gas diffusion in fly ash concrete [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(4):523-529. (in Chinese)