

引用本文:蒋建华,裘佳琪,付用全,等. 恒定气候环境下表面裂缝对混凝土内部湿度响应的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(3): 99-106.

JIANG Jian-hua, QIU Jia-qi, FU Yong-quan, et al. Influence of Surface Cracks on Humidity Response of Concrete Under Constant Climatic Environment[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(3): 99-106.

DOI:10.19815/j.jace.2020.09027

# 恒定气候环境下表面裂缝对混凝土内部湿度响应的影响

蒋建华, 裘佳琪, 付用全, 林明益, 胡飞飞

(河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210024)

**摘要:**为了研究开裂混凝土内部微环境与外部环境的湿度响应关系,通过人工模拟恒定气候环境,开展了不同裂缝工况下混凝土内部湿度响应试验,并考虑了不同水灰比和不同粉煤灰掺量的影响;提出了考虑表面裂缝影响的混凝土等效湿气扩散系数计算公式,建立了恒定气候环境下带表面裂缝混凝土内部湿度响应预测模型,并验证了模型的可行性。结果表明:有裂缝混凝土内部湿度响应速率高于无裂缝混凝土,在裂缝工况下,混凝土湿度响应速率随裂缝宽度的增加变化不明显,随裂缝深度的增加呈线性增大;有裂缝混凝土内部湿度响应速率随水灰比的增大而增大,无粉煤灰的普通混凝土试件内部湿度响应速率依次大于 30% 和 15% 粉煤灰掺量(质量分数)试件;裂缝在不同水灰比及不同粉煤灰掺量下对混凝土内部湿度响应的影响程度有所不同。

**关键词:**混凝土;湿度响应;水灰比;粉煤灰;裂缝宽度;裂缝深度

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2021)03-0099-08

## Influence of Surface Cracks on Humidity Response of Concrete Under Constant Climatic Environment

JIANG Jian-hua, QIU Jia-qi, FU Yong-quan, LIN Ming-yi, HU Fei-fei

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

**Abstract:** In order to study the humidity response relationship between the internal micro-environment and the external environment of cracked concrete, the internal humidity response tests of concrete under different crack conditions were carried out by artificially simulating the constant climatic environment, and the effects of different water cement ratios and fly ash contents were also considered. Finally, a formula for calculating the equivalent moisture diffusion coefficient of concrete considering the effect of surface crack was proposed, and the prediction model of internal humidity response of concrete with surface crack under the constant climatic environment was established, then the feasibility of the model was verified. The results show that the internal humidity response rate of cracked concrete is higher than that of non-cracked concrete. Under the crack conditions, the humidity response rate of concrete does not change

收稿日期: 2020-09-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51408192); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200202232)

作者简介: 蒋建华(1982-), 男, 重庆忠县人, 副教授, 工学博士, E-mail: jhjiang1982@126.com.

significantly with the increase of crack width, but increases linearly with the increase of crack depth. The humidity response rate of cracked concrete increases with the increase of the water-cement ratio, and the humidity response rate of concrete without fly ash is the fastest, followed by the concrete with the fly ash content of 30% and 15%. Moreover, there are differences in the significance of the effect of cracks on the internal humidity response of concrete with different water-cement ratios and fly ash contents.

**Key words:** concrete; humidity response; water-cement ratio; fly ash; crack width; crack depth

0 引言

混凝土结构工程的耐久性问题造成了大量经济损失,引起了工程界的日益关注。混凝土含湿状态是影响混凝土结构耐久性的主要因素之一<sup>[1]</sup>。混凝土的硅-碱反应、冻融破坏、氯离子侵蚀、碳化以及钢筋锈蚀等耐久性问题均与混凝土孔隙含水量有关<sup>[2-6]</sup>。混凝土内部的含湿状态又很大程度上取决于外部气候环境,内部相对湿度总是随着环境相对湿度的变化而变化<sup>[7]</sup>。

一般认为,在稳定的大气环境作用下,混凝土内部相对湿度变化发生于近表面区域,在临界深度之外趋于常数<sup>[8-9]</sup>。温度、湿质扩散率作为影响混凝土内部相对湿度的重要因素得到了广泛的认同<sup>[1,10]</sup>。同时,为定量化研究大气环境对混凝土内部湿度环境的作用关系,刘鹏等<sup>[11]</sup>利用气象资料理论推导出自然环境湿度作用谱和混凝土内湿度响应谱模型;Jiang 等<sup>[12]</sup>基于某一特定区域的气象资料,利用数学方法从温度和湿度出发建立气候作用谱,相应地建立了微环境作用谱。目前,对混凝土内部湿度响应的研究多基于材料层面,实际的混凝土结构需承担荷载作用,研究荷载效应的影响具有实际意义。Min 等<sup>[10]</sup>通过试验验证了混凝土内部相对湿度响应速率随着荷载损伤程度的增加而加快。Ryu 等<sup>[8]</sup>通过试验对比发现,随着裂缝宽度的增大,混凝土内部呈现出较快的干燥速率。实际混凝土结构往往是带裂缝工作的,而目前进行混凝土内部相对湿度响应研究时较少考虑表面裂缝的影响,研究带裂缝混凝土的内部湿度响应对服役混凝土结构的耐久性和寿命预测有重要意义。

本文通过人工模拟恒定气候环境,考虑不同水灰比和不同粉煤灰掺量工况,研究混凝土表面不同宽度和不同深度裂缝对混凝土试件内部湿度响应的影响规律和机理,并提出考虑裂缝影响的混凝土内部湿度响应预测模型。

1 试验方案

1.1 试件设计

湿度响应试件采用尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm 的混凝土立方体试件,混凝土内部湿度测量如图 1 所示。本文的湿度响应试验中,考虑不同水灰比工况时,采用水灰比  $w/c$  分别为 0.33,0.40 和 0.50 的普通混凝土;考虑不同粉煤灰掺量工况时,保持水胶比为 0.40 不变,粉煤灰掺量(质量分数) $w(FA)$  分别为 0%,15%和 30%,具体配合比如表 1 所示。试验中水泥采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥;细骨料采用河砂(中砂),细度模数为 2.5;粗骨料采用粒径为 5~15 mm 的碎石;粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰;减水剂为液态聚羧酸减水剂;拌合水为普通自来水。

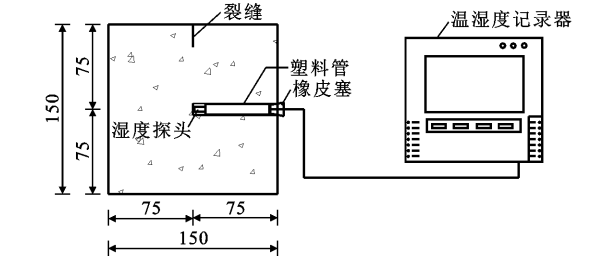


图 1 混凝土内部湿度测量示意(单位:mm)

Fig.1 Diagram of Concrete Internal Humidity Measurement (Unit:mm)

表 1 混凝土试件配合比

Tab.1 Mix Proportions of Concrete Specimens

水灰比	各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )					
	水	水泥	粉煤灰	细骨料	粗骨料	减水剂
0.33	171	512		636	1 131	3.1
0.40	180	450		655	1 165	1.8
0.50	200	400		666	1 184	0.0
0.40	180	382	68	655	1 165	1.8
0.40	180	315	135	655	1 165	1.8

1.2 试件制备

采用侧面开孔的木模具,在混凝土浇筑时,将直径略大于湿度探头外径的 PVC 管通过模具的侧面

孔洞置入模具内部 75 mm,形成预留孔洞,用以放置湿度探头。混凝土振捣抹平后,利用钢片在混凝土试件上表面预制出试验所需的表面裂缝。裂缝预制过程具体如下:钢片表面涂油,将钢片垂直插入试件浇筑表面的中间位置,插入深度依据试验设计的裂缝深度;混凝土终凝前小心拔出钢片,避免对混凝土的扰动;为防止裂缝自愈合,将钢片重新插入裂缝中,混凝土试件在标准条件下(温度 20 ℃±2 ℃,环境相对湿度 95%以上)养护 28 d,湿度响应试验前取出钢片。不同水灰比和不同粉煤灰掺量工况的混凝土试件表面裂缝设计如表 2 所示。

表 2 带表面裂缝混凝土试件设计

Tab. 2 Design of Concrete Specimen with Surface Crack			
水灰比	粉煤灰掺量/%	裂缝宽度 $W_{cr}$ /mm	裂缝深度 $H_{cr}$ /mm
0.33	0	0.00	0
		0.15	20
		0.30	10
			20
			30
		0.45	20
0.40	0	0.00	0
		0.15	20
		0.30	10
			20
			30
		0.45	20
0.50	0	0.00	0
		0.15	20
		0.30	10
			20
			30
		0.45	20
0.40	15	0.00	0
		0.15	20
		0.30	10
			20
			30
		0.45	20
0.40	30	0.00	0
		0.15	20
		0.30	10
			20
			30
		0.45	20

1.3 湿度响应试验

将湿度探头插入孔洞底端并用橡皮塞密封孔洞,橡皮塞和孔洞的缝隙用密封胶密封。为研究带

表面裂缝混凝土的正向一维湿度响应过程,湿度响应试验前将试件置于真空干燥箱中干燥处理<sup>[13]</sup>,待混凝土试件内部初始湿度为 60%±3%时取出,选取带裂缝的浇筑面作为暴露面,其余面用密封胶带密封,然后将试件置于温度为 25 ℃、环境相对湿度为 95%的恒温恒湿箱(图 2)中。湿度探头外接温湿度记录器(图 3),记录器设置为每隔 30 min 记录 1 次,试验周期为 15 d。



图 2 恒温恒湿箱

Fig. 2 Constant Temperature and Humidity Box



图 3 温湿度记录器

Fig. 3 Temperature and Humidity Recorder

2 表面裂缝对混凝土内部湿度响应的影响分析

2.1 不同宽度裂缝的影响

为了研究不同宽度的表面裂缝对混凝土试件内部湿度响应的影响规律,取裂缝深度为 20 mm,裂缝宽度为 0.15,0.30,0.45 mm 的混凝土试件与无裂缝混凝土试件的湿度响应数据进行对比分析。不同水灰比、不同粉煤灰掺量工况下,不同宽度的表面裂缝对混凝土内部湿度响应影响曲线如图 4 所示。

由图 4 可知,在不同水灰比和不同粉煤灰掺量下,有裂缝混凝土与无裂缝混凝土相对湿度均滞后于环境相对湿度。湿度响应前期,由于混凝土内外

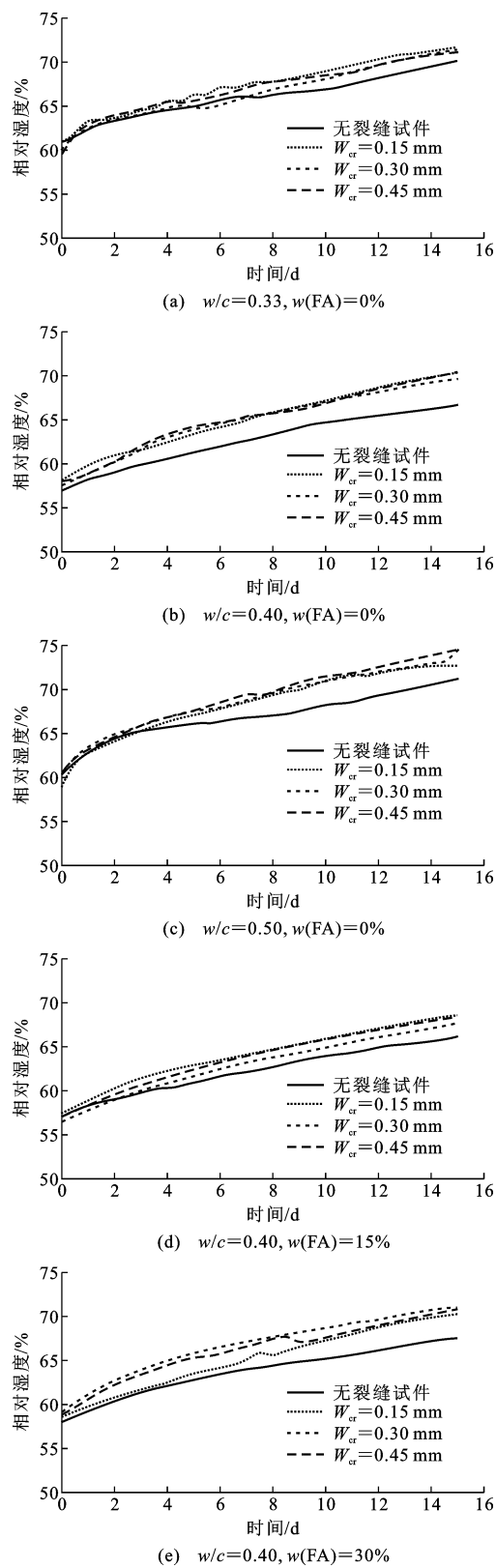


图4 不同宽度裂缝混凝土相对湿度响应曲线  
Fig. 4 RH Response Curves of Concrete with Different Width Cracks

湿度梯度较大,湿度增长较快,随着湿度响应的继续,内部湿度增长减缓。比较不同裂缝宽度的温度

响应曲线发现无裂缝混凝土内部湿度增长最慢,不同宽度裂缝引起的混凝土内部湿度响应差异并不显著。

为了进一步定量分析不同宽度裂缝对混凝土湿度响应的影响规律,定义混凝土湿度响应速率为试验周期内湿度增加量与试验周期的比值。分别求出不同水灰比和不同粉煤灰掺量工况下混凝土的湿度响应速率,如图5所示。

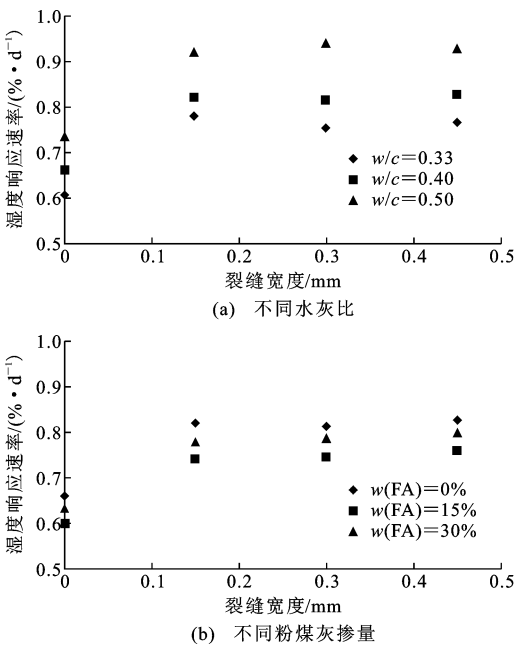


图5 不同宽度裂缝混凝土相对湿度响应速率  
Fig. 5 RH Response Rate of Concrete with Different Width Cracks

图5表明,水灰比和粉煤灰掺量一定时,有裂缝混凝土内部湿度响应速率均高于无裂缝混凝土,混凝土内部湿度响应速率随裂缝宽度的增大变化不明显,即在本文研究的宽度范围内,裂缝宽度对混凝土内部湿度响应的影响不显著。这主要因为裂缝宽度的改变并未引起湿气传输路径的改变,即湿气到达混凝土内部指定位置的距离并未改变,由于裂缝处于混凝土内部,相较于混凝土表层的湿气交换,较小宽度的裂缝内部气流更稳定,湿气交换也更慢,因此裂缝宽度对混凝土内部湿度响应的影响并不明显。

表面裂缝宽度一定时,湿度响应速率随水灰比的增大而增大。这是由于湿质扩散系数随着水灰比的增大而增长,内部相对湿度响应速率随之增大。水灰比为0.50的平均速率比水灰比为0.33的平均速率增大17%~25%,比水灰比为0.40的平均速率增大12%~16%。另一方面,未掺粉煤灰的混凝土湿度响应速率最快,粉煤灰掺量30%的混凝土次

之,粉煤灰掺量为 15% 的混凝土湿度响应速率最慢。具体表现为,未掺粉煤灰的混凝土湿度响应平均速率比粉煤灰掺量为 15% 的混凝土增大 8%~11%,比粉煤灰掺量 30% 的混凝土增大 3%~5%。这主要因为掺量为 15% 的粉煤灰使混凝土最可几孔径及平均孔径减小,微观结构更密实,而粉煤灰掺量 30% 混凝土的最可几孔径和平均孔径与普通混凝土相当<sup>[14]</sup>。结构的致密程度显著影响了内部相对湿度响应速率。

### 2.2 不同深度裂缝的影响

为了研究不同深度的表面裂缝对混凝土试件内部湿度响应的影响规律,取裂缝宽度为 0.30 mm,裂缝深度为 10,20,30 mm 的混凝土试件与无表面裂缝的混凝土试件湿度响应结果进行对比分析。不同水灰比、不同粉煤灰掺量工况下,不同深度的表面裂缝对混凝土内部湿度响应影响曲线如图 6 所示。

由图 6 可知,湿度响应时间一定时,混凝土内部相对湿度值随表面裂缝深度的增加而增大。由于裂缝深度的增大,缩短了湿气传输路径,裂缝深度越深试件内部湿气传输越快。为进一步定量分析不同水灰比和粉煤灰掺量工况下裂缝深度对混凝土内部湿度响应的影响,分别求出不同水灰比和粉煤灰掺量工况下混凝土的湿度响应速率,得到不同深度裂缝与湿度响应速率的关系,如图 7 所示。

由图 7 可知,不同水灰比和粉煤灰掺量工况下的混凝土均表现为有裂缝混凝土试件内部湿度响应速率高于无裂缝试件,且随裂缝深度的增加,混凝土试件内部湿度响应速率呈线性增大。裂缝深度相同时,混凝土内部湿度响应速率随水灰比的增大而增大,水灰比为 0.50 的混凝土湿度响应速率比水灰比为 0.33 的混凝土增大 15%~25%。未掺粉煤灰的混凝土内部相对湿度响应速率最快,粉煤灰掺量为 30% 的混凝土次之,粉煤灰掺量为 15% 的最小,这与第 2.1 节的研究结果一致。

不同水灰比工况下水灰比越大,裂缝深度对混凝土内部湿度响应影响越明显;粉煤灰掺量为 30% 时,裂缝深度对混凝土湿度响应的影响较粉煤灰掺量为 15% 时明显。这主要是因为水灰比越大和粉煤灰掺量过大时,均会导致混凝土孔隙率增大,内部孔隙结构越不致密,湿气传输系数越大,因而裂缝的影响更显著。

## 3 考虑裂缝影响的混凝土内部湿度响应预测模型

裂缝的存在会改变外部环境湿气进入混凝土内

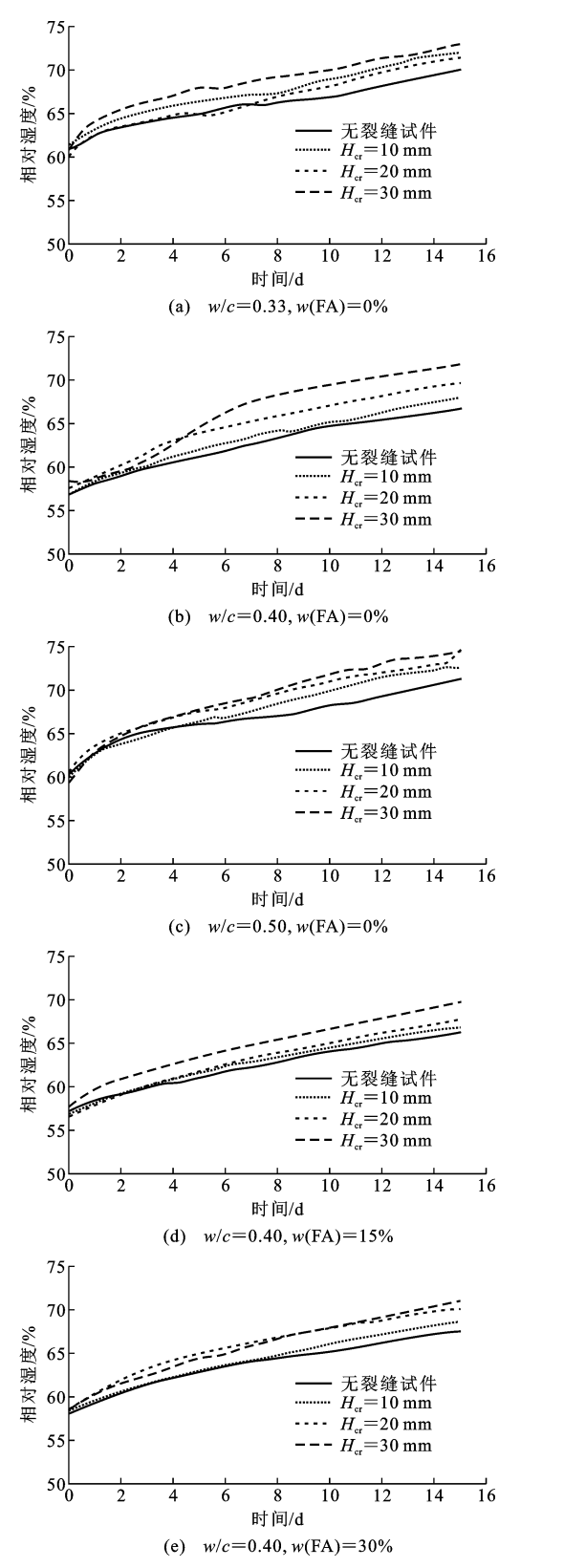


图 6 不同深度裂缝混凝土相对湿度响应曲线  
Fig. 6 RH Response Curves of Concrete with Different Depth Cracks

部环境的路径,从而影响混凝土的湿度响应,因此在建立服役环境下混凝土内部湿度响应预测模型时应

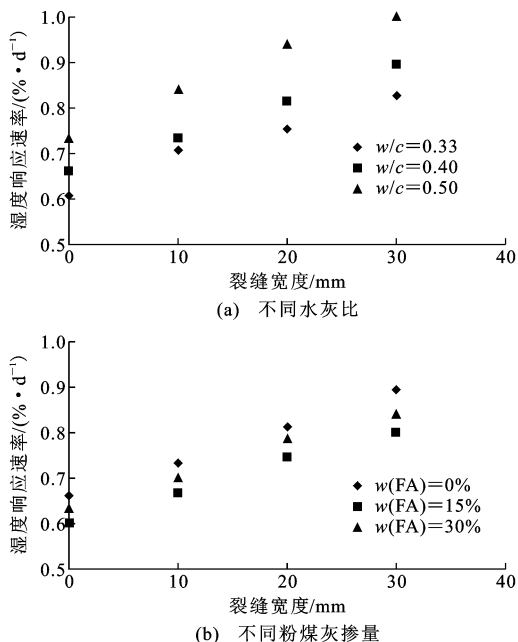


图7 不同深度裂缝混凝土湿度响应速率  
Fig. 7 RH Response Rate of Concrete with Different Crack Depths

考虑裂缝的影响。在建立预测模型时,为同时反映裂缝宽度和深度的影响,可选取裂缝体积作为定量表征裂缝的指标。

本文研究的带表面裂缝的混凝土试件相对湿度一维响应过程可分为湿气在未开裂混凝土中的扩散过程及湿气在裂缝内的扩散过程。湿气在裂缝内的扩散过程可近似看作湿气在空气中的扩散。根据相关文献[15],空气中的湿气扩散系数大小一般在  $1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,与压强、温度等因素有关。鉴于混凝土裂缝宽度较小,且裂缝中空气流通性差,本文取裂缝中的湿气扩散系数  $D_c$  为  $1.50 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。未开裂混凝土的湿气扩散系数可通过公式(1)计算得到[16]

$$D_p = \exp(0.7414w/c + 0.0385T + 0.037\Delta H - 14.192) \quad (1)$$

式中: $D_p$  为无裂缝混凝土等效湿气扩散系数; $T$  为混凝土内温度; $\Delta H$  为混凝土内外初始湿度差。

参照文献[17],可通过考虑裂缝对混凝土传质系数的影响,进而考虑裂缝存在对混凝土传质过程的影响,带表面裂缝的混凝土等效湿气扩散系数可表达如下

$$D_{cr} = \frac{D_c V_c + D_p V_p}{V_c + V_p} \quad (2)$$

式中: $D_{cr}$  为带裂缝混凝土的等效湿气扩散系数; $V_c$  为裂缝的体积; $V_p$  为未开裂混凝土的体积。

由文献[16]可知,混凝土内部任意位置、任意时刻的相对湿度可用式(3)表示

$$H = H_e - (H_e - H_0) \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cr}t}}\right) \quad (3)$$

式中: $H$  为任意时间混凝土内部任意位置处的相对湿度; $H_0$  为混凝土试件内部初始相对湿度; $H_e$  为环境相对湿度; $\operatorname{erf}(\varphi)$  为误差函数,  $\varphi = x/(2\sqrt{D_{cr}t})$ ;  $x$  为混凝土内部指定位置距混凝土暴露面深度; $t$  为湿度响应时间。

在混凝土相对湿度响应预计模型公式(3)中,涉及误差函数  $\operatorname{erf}(\varphi)$  的计算,本文采用双曲正切函数近似算法[18],即

$$\operatorname{erf}(\varphi) = \tanh(1.12838\varphi + 0.10277\varphi^3) \quad (4)$$

下面以水灰比为 0.40,裂缝宽度为 0.30 mm,裂缝深度为 30 mm 的混凝土试件为例,介绍理论模型的验证过程。混凝土内部温度  $T = 20^\circ \text{C}$ ,混凝土内部初始相对湿度  $H_0 = 58.5\%$ ,环境相对湿度  $H_e = 95.0\%$ 。具体验证过程为:

(1)首先计算带裂缝混凝土的等效湿气扩散系数  $D_{cr}$ ,由式(1)可得  $D_p = 7.70 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ,取  $D_c = 5.40 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ,裂缝体积  $V_c = 1.35 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ ,无裂缝的混凝土体积  $V_p = 3.37 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 。因此,可计算出  $D_{cr} = 9.85 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ 。

(2)将  $x = 0.075 \text{ m}$  和  $t, D_{cr}$  代入计算不同时刻的  $\varphi$  值,然后将  $\varphi$  值代入公式(4),得到不同时刻的误差函数  $\operatorname{erf}(\varphi)$  值。

(3)将已知的  $H_0, H_e$  以及不同时刻对应的误差函数  $\operatorname{erf}(\varphi)$  值代入公式(3),计算出不同时刻的混凝土内部相对湿度值,湿度响应理论值与实测值的对比如图 8 所示。

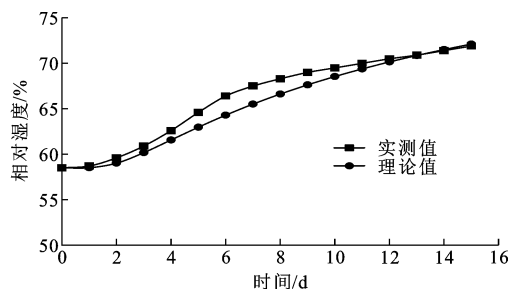


图8 混凝土湿度理论值与实测值的比较  
Fig. 8 Comparison Between Theoretical and Measured RH of Concrete

由图 8 可知,相对湿度理论值与实测值的均值分别为 65.46%, 66.27%, 标准差分别为 4.69%, 4.62%, 均值和标准差的差值均在 1% 以内,且 2 组数据的判定系数  $R^2$  为 0.988,表明理论值与实测值

吻合度较好,建立的考虑表面裂缝影响的混凝土内部相对湿度响应预测模型可行。

## 4 结 语

(1)同一水灰比和粉煤灰掺量工况下,有裂缝混凝土内部湿度响应速率高于无裂缝混凝土内部湿度响应速率,在本文所研究的裂缝宽度和深度范围内,混凝土内部湿度响应速率随裂缝宽度的增大变化不明显,随裂缝深度的增大呈线性增大。

(2)裂缝形态一定时,混凝土内部湿度响应速率随水灰比的增大而增大;对于不同粉煤灰掺量工况,未掺粉煤灰混凝土试件内部湿度响应速率最快,粉煤灰掺量30%的混凝土次之,粉煤灰掺量15%的最小。

(3)不同水灰比混凝土相比较而言,水灰比越大,裂缝对混凝土湿度响应的影响越显著;不同粉煤灰掺量混凝土相比较而言,粉煤灰掺量为30%时裂缝对混凝土湿度响应的影响较粉煤灰掺量为15%时显著。

(4)提出了考虑表面裂缝影响的混凝土等效湿气扩散系数计算公式,进而建立恒定气候环境下带表面裂缝混凝土内部湿度响应预测模型,模型理论值与实测值吻合较好,验证了该模型的可行性。

## 参考文献:

## References:

- [1] ANDRADE C, SARRIA J, ALONSO C. Relative Humidity in the Interior of Concrete Exposed to Natural and Artificial Weathering[J]. *Cement & Concrete Research*, 1999, 29(8): 1249-1259.
- [2] 韩学强,詹树林,徐 强,等.干湿循环作用对混凝土抗氯离子渗透侵蚀性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(1): 198-204.  
HAN Xue-qiang, ZHAN Shu-lin, XU Qiang, et al. Effect of Dry-wet Cycling on Resistance of Concrete to Chloride Ion Permeation Erosion[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(1): 198-204.
- [3] 方小婉,娄宗科,高亚磊,等.硫酸盐侵蚀下混凝土抗冻耐久性研究进展[J]. *混凝土*, 2019(12): 6-10, 17.  
FANG Xiao-wan, LOU Zong-ke, GAO Ya-lei, et al. Research Progress on Frost Resistance Durability of Concrete Under Sulfate Attack[J]. *Concrete*, 2019(12): 6-10, 17.
- [4] 毛继泽,齐 辉,鮎田耕一.轻骨料含水率对混凝土吸水性及抗冻性的影响[J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(4): 473-477.

- MAO Ji-ze, QI Hui, AYUTA Ko-ichi. Effects of Water Content in Lightweight Aggregate on Water-absorbing Property and Freeze-thaw Resistance of Concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(4): 473-477.
- [5] AHLSTROM J, TIDBLAD J, SEDERHOLM B, et al. Influence of Chloride and Moisture Content on Steel Rebar Corrosion in Concrete[J]. *Materials and Corrosion*, 2016, 67(10): 1049-1058.
- [6] SIMCIC T, PEJOVNIK S, SCHUTTER G D, et al. Chloride Ion Penetration into Fly Ash Modified Concrete During Wetting-drying Cycles[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93: 1216-1223.
- [7] 马文彬,李 果.自然气候条件下混凝土内部温湿度响应规律研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2007(2): 18-21.  
MA Wen-bin, LI Guo. Research on the Response Law of Temperature and Humidity in Concrete Under Natural Climate Conditions[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2007(2): 18-21.
- [8] RYU D W, KO J W, NOGUCHI T. Effects of Simulated Environmental Conditions on the Internal Relative Humidity and Relative Moisture Content Distribution of Exposed Concrete[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2011, 33: 142-153.
- [9] LIU P, SONG L, YU Z. Quantitative Moisture Model of Interior Concrete in Structures Exposed to Natural Weather[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 102: 76-83.
- [10] 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.
- [11] 刘 鹏,余志武,宋 力.自然环境中混凝土内湿度响应规律[J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(3): 388-393.  
LIU Peng, YU Zhi-wu, SONG Li. The Humidity Response Law in Concrete in the Natural Environment[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(3): 388-393.
- [12] JIANG J, YUAN Y. Quantitative Models of Climate Load and Its Effect in Concrete Structure[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 29: 102-107.
- [13] 张国辉,李宗利,张林飞,等.干燥条件对混凝土强度影响试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(5): 840-846.  
ZHANG Guo-hui, LI Zong-li, ZHANG Lin-fei, et al. Experimental Study on Concrete Strength for Differ-

ent Drying Conditions[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(5): 840-846.

[14] 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 Cai-feng, YUAN Ying-shu, JIANG Jian-hua. Effect of Pore Structure on Gas Diffusion in Fly Ash Concrete[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(4): 523-529.

[15] 王建贵,杨匡宋. 空气中水蒸气的扩散系数及平均自由程的测定[J]. 物理实验, 1986(6): 284-285.

WANG Jian-gui, YANG Kuang-song. Measurement of Diffusion Coefficient and Mean Free Path of Water Vapor in Air[J]. Physics Experimentation, 1986(6): 284-285.

[16] 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 Jian-hua, YUAN Ying-shu, WANG Song-lin, 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.

[17] GERARD B, MARCHAND J. Influence of Cracking on the Diffusion Properties of Cement-based Materials: Part I : Influence of Continuous Cracks on the Steady-state Regime[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(1): 37-43.

[18] 田锦州,徐乃忠,李凤明. 误差函数  $\text{erf}(x)$  近似计算及其在开采沉陷预计中的应用[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2009, 14(2): 33-35.

TIAN Jin-zhou, XU Nai-zhong, LI Feng-ming. Proximate Calculation of Error Function  $\text{erf}(x)$  and Its Application in Mining Subsidence Prediction[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2009, 14(2): 33-35.