

DOI: 10.7511/jslx20240225001

混凝土二维毛细吸水规律研究的细观数值模拟方法

王立成*, 殷鸿杰, 邹凯

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

摘要:当混凝土结构表面局部区域或角部位置相邻侧面与潮湿环境接触时,水分在非饱和混凝土中将以二维毛细吸水的方式传输,呈现与一维毛细吸水过程不同的规律。本文基于非饱和流体理论,建立了混凝土二维毛细吸水规律研究的细观数值模拟方法,并开展了混凝土二维毛细吸水过程的数值仿真分析。结果发现,相同时间内,毛细吸水高度随混凝土表面与水接触区域面积的减小而减小,但单位面积的累计吸水量却表现出增加规律。骨料和界面过渡区(ITZ)会分别抑制和促进混凝土局部区域的二维毛细吸水过程。在数值模拟基础上,建立了混凝土一维与二维毛细吸水率之间的关系式。此外,定量分析了混凝土构件角部区域毛细吸水过程的交互效应。

关键词:混凝土;二维毛细吸水;细观方法;数值模拟;吸水率

中图分类号:O242.21

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2025)03-0478-07

1 引言

混凝土的吸水性能是影响钢筋混凝土结构耐久性的重要因素^[1]。首先,水分直接参与混凝土中大多数劣化过程,如冻融破坏、钢筋锈蚀等^[2,3]。其次,水作为有害物质侵入混凝土内部的载体,间接参与氯离子侵蚀、碳化等过程^[4]。潮差区或浪溅区的海工混凝土结构通常处于非饱和状态,毛细吸水过程成为水分和有害物质(或离子)的主要侵入机制。

目前,关于混凝土一维毛细吸水规律的研究已经较为成熟,这是因为混凝土一维毛细吸水过程的物理机理明确,控制方程简单,通过试验很容易得出混凝土的毛细吸水率,试验方法和原理如图1(a)所示。然而,实际工程中混凝土结构表面的毛细吸水往往是一个二维甚至三维问题,如混凝土构件某一表面局部区域与水源接触时,如图1(b)所示,水分由接触面进入混凝土后将沿竖直和水平两个方向运动,水分传输呈现二维规律,一维条件下的控制方程将不再适用。另外,梁、柱构件角部区域两个侧面同时接触到水源时,水分会沿两个垂直方向传输进入混凝土内部,如图1(c)所

示。工程实践发现,当钢筋位于构件角部区域时比位于中间部位更容易遭受到氯盐的侵蚀^[5,6]。因此,开展混凝土二维毛细吸水规律研究是探索混凝土的氯离子侵蚀、冻融破坏等劣化过程的基础,有助于更加精确地开展混凝土结构的耐久性分析和使用寿命评估。

国内外学者已针对混凝土的二维毛细吸水规律开展了理论和试验研究,并取得了一定的成果。如 Hall^[7]基于尖锐湿润锋模型,建立了混凝土试件与水源接触面为条形时累计吸水量与时间的关系。Xiao 等^[8]对从小/局部圆形水源到半无限均质多孔材料的毛细吸水过程进行了理论研究,发现毛细吸水高 h 与时间 t 之间存在立方根关系,即 $h \sim t^{1/3}$ 。Benner 等^[9]基于椭圆坐标系求解以毛细吸水速度势为变量的 Laplace 方程,建立了毛细吸水高度 h 与时间 t 的关系。以上理论模型中,假设湿润锋形状遵循某种规律并且湿润区域均处于饱和状态,存在不同程度的局限性。Hallaji 等^[10]使用电阻断层扫描技术和中子射线成像技术对砂浆二维毛细吸水过程进行成像跟踪,获得了水分分布的高分辨率图像,进而得到了砂浆中的水分含量分布规律。Voss 等^[11]采用电容层析成像技术成

收稿日期:2024-02-25;修改稿收到日期:2024-04-02.

基金项目:辽宁省自然科学基金(2020-MS-100);辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC2211006)资助项目.

作者简介:王立成*(1975-),男,博士,教授,博士生导师(E-mail:wanglich@dut.edu.cn).

引用本文:王立成,殷鸿杰,邹凯.混凝土二维毛细吸水规律研究的细观数值模拟方法[J].计算力学学报,2025,42(3):478-484.

WANG Li-cheng, YIN Hong-jie, ZOU Kai. Mesoscopic method for simulating the two-dimensional capillary water absorption process of concrete[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2025, 42(3): 478-484.

功观测到了圆饼形试件顶部和底部的局部区域与水源接触情况下,湿润锋的位置和形状。Van Belleghem 等^[12]分别基于测重法和 X 射线计算机断层扫描技术开展毛细吸水试验,得到了砂浆表面局部区域与水源接触情况下累积吸水曲线和水分含量的分布规律。

开展砂浆或混凝土的二维毛细吸水试验,获得材料内部含水量分布规律,往往需要大量时间和物力支持,而通过数值模拟方法可以在短时间内完成考虑混凝土细观结构层次特征的仿真计算,揭示混凝土二维毛细吸水过程的一般规律。

本文通过建立混凝土二维毛细吸水过程的细观数值模型,分析二维毛细吸水情况下水分分布随水源接触区域宽度以及湿润锋随时间的变化规律,对比粗骨料、界面过渡区(ITZ)对毛细吸水过程的影响规律。基于累积吸水曲线,建立一维与二维毛细吸水率之间的关系,并通过角部毛细吸水高度量化分析二维毛细吸水的交互效应。

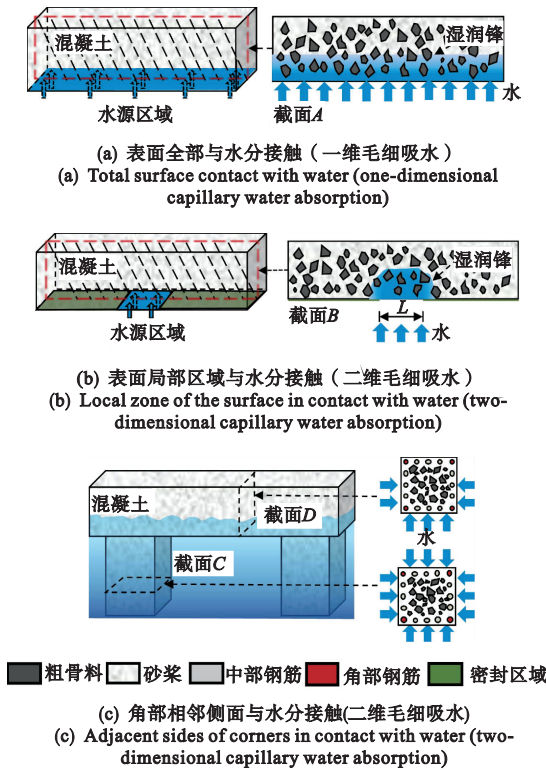


Fig. 1 One- and two-dimensional capillary water absorption in concrete

2 水泥基材料二维毛细吸水理论

为研究水泥基材料表面局部区域与水源接触时的毛细吸水过程,Liang 等^[13]基于 Terzaghi 模型及以下假设:(1)材料湿润锋以下部分处于饱和

状态;(2)忽略水的重力效应;(3)湿润锋等势线由平行于与水接触面的线段以及两个半径为毛细吸水高度 h 的圆弧组成,建立了砂浆二维毛细吸水高度 h 与吸水时间 t 的关系表达式,即

$$t = \frac{1}{2\pi^2 K^2} \left[(\pi h + L)^2 \ln \frac{(\pi h + L)^2}{eL^2} + L^2 \right] \quad (1)$$

式中 K 为毛细管系数($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$), L 为水分接触宽度(mm)。

单位面积累计吸水量 i 的表达式为

$$i = \frac{\Delta m}{\rho_w L d_z} = S \cdot t^{0.5} + b \quad (2)$$

式中 Δm 为给定时间内试件的累计吸水量(g), ρ_w 是水的密度(g/mm^3), d_z 为试件厚度(mm), S 是材料一维毛细吸水状态下的吸水率($\text{mm}/\text{min}^{0.5}$), b 为常数项,由试件最初与水接触时的快速吸水引起。

二维毛细吸水理论模型中单位面积累计吸水量 i 与毛细吸水高度 h 的关系为^[13]

$$i = \frac{S}{K} \left(\frac{\pi}{2L} h^2 + h \right) \quad (3)$$

3 数值模型

3.1 控制方程

砂浆和混凝土毛细吸水过程通常采用非饱和流体理论来描述,将扩展的达西定律与质量守恒方程结合得出的 Richards 方程^[14]为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) \quad (4)$$

式中 θ 为相对含水量, $\theta = (\Theta - \Theta_i) / (\Theta_s - \Theta_i)$, Θ 为体积含水量, Θ_i 和 Θ_s 分别为初始含水量和饱和含水量, $D(\theta)$ 为水分扩散系数(m^2/s)。水分扩散系数与材料属性和相对含水量有关,现有研究提出了多种水分扩散系数模型,其中指数型水分扩散系数得到广泛使用^[12,15],其表达式为

$$D(\theta) = D_0 e^{n\theta} \quad (5)$$

式中 n 是经验参数,一般取 $6 \sim 9$ ^[12,16],参数 D_0 的表达式为

$$D_0 = \frac{n^2 S^2}{(\Theta_s - \Theta_i)^2 [e^n (2n - 1) - n + 1]} \quad (6)$$

3.2 随机骨料模型

在细观尺度下认为混凝土是多相非均质复合材料,本研究建立由水泥砂浆、粗骨料、ITZ 三相材料组成的二维混凝土数值模型,如图 2 所示。其中,由于粗骨料形状对毛细吸水过程影响较小,将粗骨料形状简化为圆形^[17]。Walraven 等^[18]基于

Fuller 公式将三维骨料级配曲线转化为混凝土试件某一截面内任意点粗骨料直径 $d < d_0$ 的概率 P_c ($d < d_0$), 表达式为

$$P_c(d < d_0) = P_k(1.065d_0^{0.5}d_{\max}^{-0.5} - 0.053d_0^4d_{\max}^{-4} - 0.012d_0^6d_{\max}^{-6} - 0.0045d_0^8d_{\max}^{-8} + 0.0025d_0^{10}d_{\max}^{-10}) \quad (7)$$

式中 P_k 为骨料体积占混凝土总体积的比例, 通常取为 0.75, d_0 为骨料筛孔直径 (mm), $d_{\max}$ 为骨料最大直径 (mm)。

基于式 (7) 生成粒径范围 5 mm~20 mm 的粗骨料, 在边长 l 为 100 mm 的正方形砂浆模型中进行随机投放并保证粗骨料间没有重叠, 计算中将粗骨料视为不透水材料。砂浆与粗骨料之间的 ITZ 是混凝土中最薄弱的区域, 其毛细吸水速率远大于砂浆区域的毛细吸水速率。研究表明, ITZ 厚度通常为 $30\text{ }\mu\text{m} \sim 50\text{ }\mu\text{m}$ ^[15,19], ITZ 与砂浆的水分扩散系数之比 D_{ITZ}/D_m 约为 $2 \sim 15$ ^[15,16,20]。本模型 ITZ 厚度取为 $50\text{ }\mu\text{m}$, D_{ITZ}/D_m 取为 10。

3.3 初始条件与边界条件

假定初始时刻砂浆和混凝土试件均处于干燥状态, 设定初始条件下模型内部的相对含水量 $\theta_0 = 0$ 。针对两种典型的混凝土二维毛细吸水工况: ①局部水源接触, $\theta(x, t) = 1, x \in [50 - L/2, 50 + L/2]$, 如图 2(a); ②角部水源相邻, $\theta(x = 0, t) = 1, \theta(y = 0, t) = 1$, 如图 2(b)。其余区域设置为无通量。在给予初始条件和边界条件后, 采用 COM-SOL 软件基于有限元法求解以上数值模型。

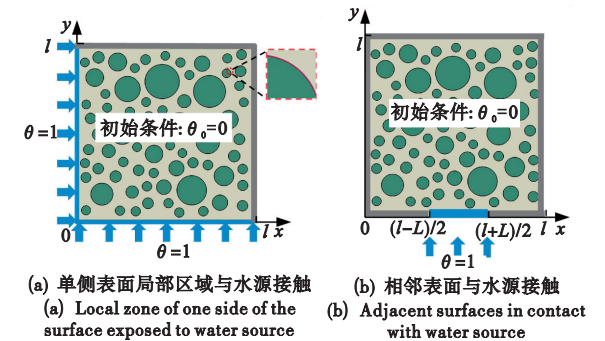


图 2 二维毛细吸水数值模拟模型的初始条件与边界条件
Fig.2 Initial and boundary conditions for numerical simulation models of the two-dimensional capillary water absorption

4 结果与讨论

4.1 水分分布规律

为探明混凝土中所含粗骨料和 ITZ 的效应, 首先开展砂浆毛细吸水过程的数值模拟。采用文献[21]试验获取的材料参数, 砂浆吸水率为

$0.0905\text{ mm}/\text{min}^{0.5}$, 由于试验初始时刻试件干燥, $\Theta_i = 0, \Theta_s$ 近似取为试件孔隙率 0.136, 吸水时间为 1800 min。按照图 2(a)的方式设置边界条件, 试件底面设置成水分接触边界。图 3 给出了 6 种水分接触宽度 L 条件下, 砂浆试件相对含水量分布云图。可以看出, 当砂浆试件底部局部区域与水源接触时, 水分分布呈放射状, 沿水平和竖直两个方向延伸, 相对含水量由水分接触面到湿润锋逐渐降低, 与 Hallaji 等^[10]通过电容层析成像和中子射线成像技术得到的水分分布云图具有相同趋势。当 $L = 100\text{ mm}$, 即砂浆试件底面完全与水接触, 此时水分分布呈现一维毛细吸水特点。

混凝土中的水分分布规律与砂浆模型相似, 呈放射状沿水平和竖直两个方向延伸, 如图 4 所示。

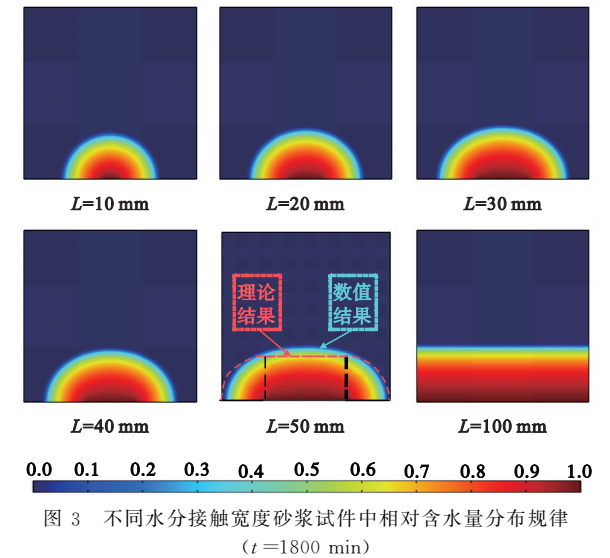


图 3 不同水分接触宽度砂浆试件中相对含水量分布规律
($t = 1800\text{ min}$)
Fig.3 Relative water content distribution in mortar specimens with different widths of water contact area($t = 1800\text{ min}$)

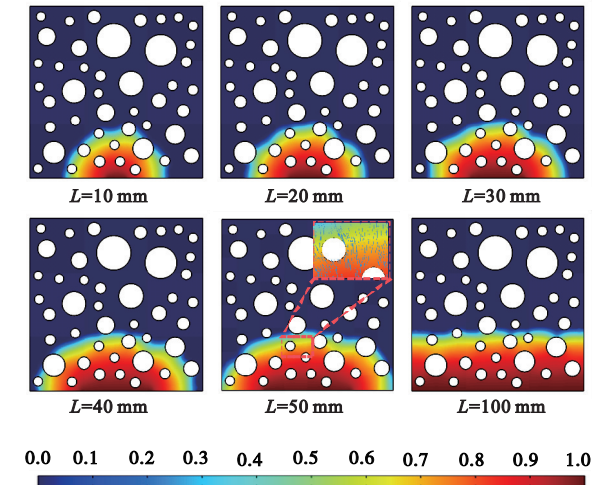


图 4 不同水分接触宽度的混凝土相对含水量分布($t = 1800\text{ min}$)
Fig.4 Relative water content distribution of concrete with different widths of water contact area($t = 1800\text{ min}$)

由于粗骨料的存在,湿润锋出现曲折,粗骨料附近的 ITZ 区域毛细吸水速度明显加快。图 5 给出了不同吸水时间后砂浆和混凝土(包括是否考虑 ITZ 两种情况)湿润锋对比,接触区域宽度 $L=50\text{ mm}$ 。在只添加粗骨料,不考虑 ITZ 情况下,混凝土中水分湿润锋出现曲折,但曲折度低于砂浆模型,证明了粗骨料产生的稀释效应和迂曲效应会降低混凝土的吸水率^[20,22]。由于 ITZ 为毛细吸水过程提供了快速通道,三相混凝土模型湿润锋高于不考虑 ITZ 的两相混凝土模型湿润锋,在局部区域内略高于砂浆模型的湿润锋,说明 ITZ 的影响不容忽视。

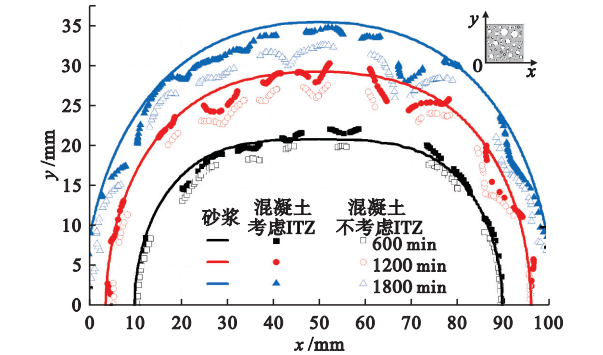


图 5 不同吸水时间后砂浆和混凝土(是否考虑 ITZ 两种情况)湿润锋对比
Fig. 5 Comparison of wetting fronts of mortar and concrete (with or without ITZ) after different water absorption times

4.2 毛细吸水高度

图 6 给出了砂浆和混凝土试件二维毛细吸水条件下,沿试件中心线 $x=50\text{ mm}$ 处计算的吸水高度随时间的变化曲线,其中水分接触设置 5 种宽度。可见,相同吸水时间时,当砂浆和混凝土底部与水分完全接触时,吸水高度最大,毛细吸水高度随水分接触宽度同步减小。此外,图 6(a)给出了按式(1)理论模型计算得到的吸水高度结果,可见,一维毛细吸水的理论结果与数值结果吻合最好,其他情况下相同时间内毛细吸水高度的数值结果大于理论结果,并且随着时间的推移两者的差距逐渐增大。产生差异的原因可能是在水分接触宽度一定的情况下,在数值计算结果中毛细吸水前期,湿润锋中段为平行于水接触面,而随着时间的推移,湿润锋中段逐渐变成凸出的圆弧,如图 3 ($L=50\text{ mm}$) 所示,而在理论模型中假设湿润锋中间段始终与接触面平行,导致毛细吸水高度出现偏差。从图 6(b)可以看出,中心线 $x=50\text{ mm}$ 处的毛细吸水高度在部分时间内呈现水平分布,这是由于水分在混凝土试件中运动到达粗骨料所在位置时,不透水的粗骨料阻碍了水分的继续前进,需要一定时

间绕过粗骨料,导致毛细吸水高度在该时间内停止增加。

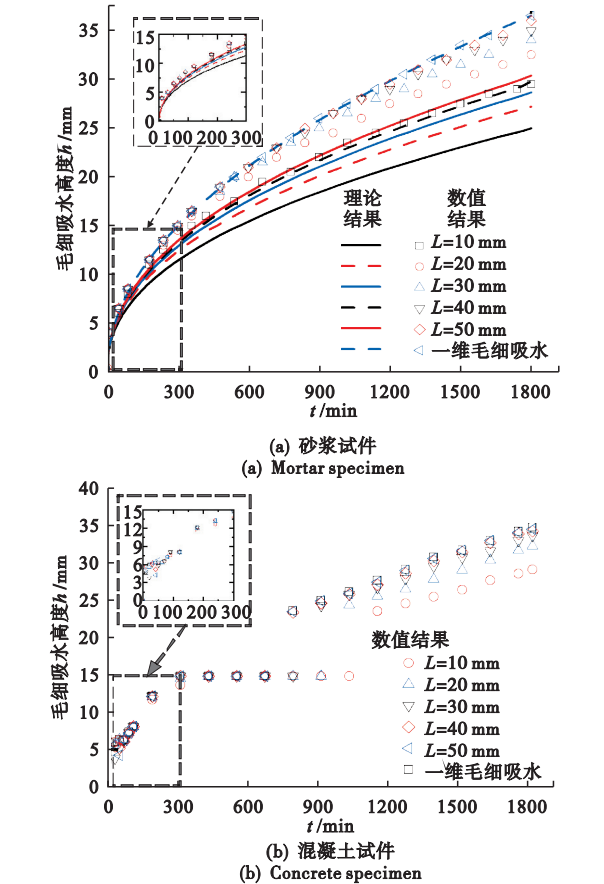


图 6 不同水分接触宽度时毛细吸水高度随时间变化曲线
Fig. 6 Curves of capillary water absorption height over time with different water contact width

4.3 累积吸水曲线

图 7 给出了不同水分接触宽度时的累积吸水曲线计算结果。与一维毛细吸水不同,二维毛细吸水对应的累积吸水曲线呈非线性,水分接触宽度越小,非线性特征越强。相同毛细吸水时间内,随着水分接触宽度的减小,单位接触面积累积吸水量增加。原因是一维毛细吸水过程中湿润锋与水分接触面平行,而二维毛细吸水的湿润锋呈现近似半椭圆形状,砂浆和混凝土内部湿润区域与干燥区域接触更加充分,水分接触宽度越小,累计吸水量的变化越明显。图 7(a)还给出了数值结果与式(1,3)理论模型结果的对比。可见,相同时间内理论结果高于数值结果,由于理论模型基于砂浆内部湿润区域为饱和状态的假设,而在数值模型中湿润区域的水分分布存在明显梯度,即并非所有湿润区域都能达到饱和状态,如 4.1 节所述。

4.4 考虑接触面积的二维毛细吸水率

基于式(8)将不同水分接触宽度下砂浆或混凝土

土试件累计吸水曲线进行线性拟合得到二维毛细吸水率 $S(L)$, 当 L 等于试件底面宽度时, $S(L)$ 即为一维毛细吸水率 S 。

$$i(L) = S(L) \cdot t^{0.5} + B \tag{8}$$

式中 $i(L)$ 为不同水分接触宽度下砂浆或混凝土试件累计吸水量 (mm), B 为常数项。

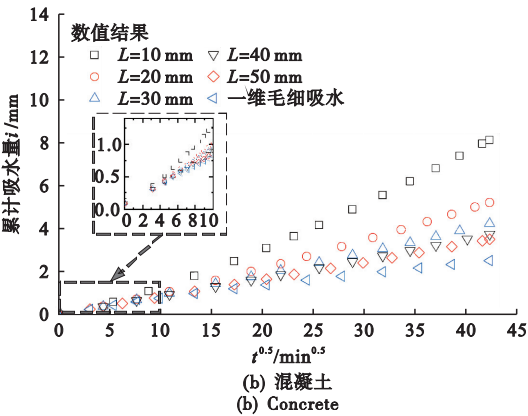
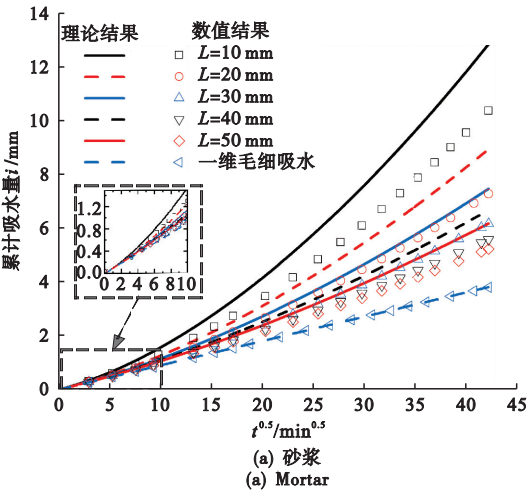


图 7 不同水分接触宽度时砂浆和混凝土的累积吸水曲线
Fig. 7 Cumulative water absorption curves of mortar and concrete with different water contact width

为避免润湿前锋与无通量边界接触引起误差, 选取吸水时间为 1800 min, 水分接触宽度 L 为 0 mm~50 mm 进行二维毛细吸水率的计算。定义一维毛细吸水率 S 与二维毛细吸水率 $S(L)$ 的比值为相对吸水率 S_R , 当 L 趋于无穷大时, 即 $S(L)$ 趋于 S , S_R 应趋于 1, 可以近似给出 S_R 的一般形式为

$$S_R = \frac{S}{S(L)} = 1.0 + \alpha e^{\beta L} \tag{9}$$

式中 α 和 β 为拟合参数。

通过数值计算分别得到砂浆和混凝土相对吸水率与水分接触宽度的关系, 如图 8 所示。可以看出, 随着水分接触宽度的增加, 相对吸水率呈非

线性规律逐渐增大。

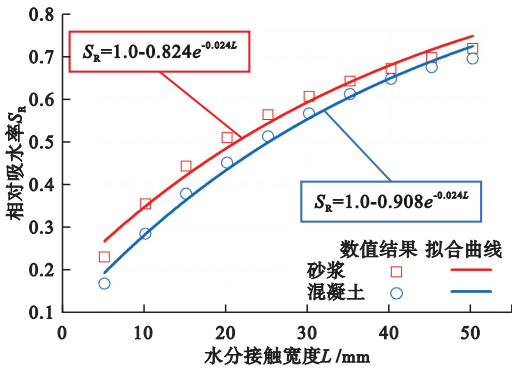


图 8 相对吸水率与水分接触宽度之间的关系
Fig. 8 Relationship between the ratio of sorptivities and the water contact width

4.5 角部毛细吸水交互效应

对于梁、柱构件的角部, 当水平和垂直表面同时接触水源时, 两个相邻表面将同时经历毛细吸水过程, 导致角部区域的相对含水量相比一维情况要高且模型角部的湿润锋表现为弧形, 如图 9 所示, 说明砂浆和混凝土角部区域的二维毛细吸水量并非简单叠加而是存在交互效应。

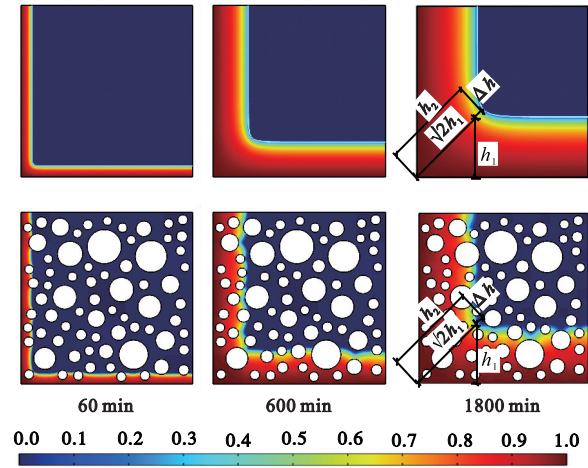


图 9 砂浆和混凝土试件角部区域二维毛细吸水结果对比
Fig. 9 Comparison of the capillary water absorption results between one-dimensional and two-dimensional corner area of the mortar and concrete specimens

为定量分析这种交互效应, 定义交互系数 k 为角部区域二维毛细吸水高度 h_2 与一维毛细吸水高度 h_1 的比值, 如图 9 所示。如果不存在交互效应, 则交互系数 k 应为 $\sqrt{2}$, 而通过数值计算得到砂浆模型的交互系数 k 高于 $\sqrt{2}$, 如图 10 所示, 其值在 1.50~1.60 范围之间。混凝土模型由于受到粗骨料和 ITZ 的影响, 交互系数随时间的变化离散性较大, 在此模型的粗骨料分布情况下, 毛细吸水时间在 900 min 到 1800 min 内, 交互系数 k 趋于稳

定,其取值在 1.40~1.60 之间,低于砂浆模型的交互系数,但仍高于 $\sqrt{2}$ 。

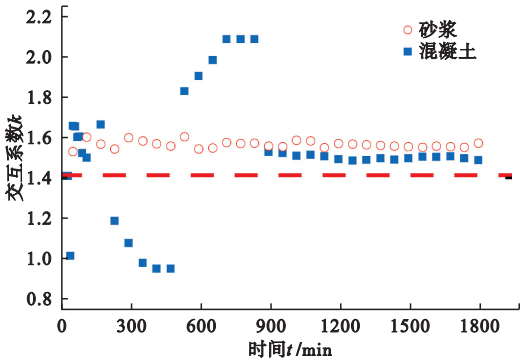


图 10 砂浆和混凝土角部区域交互系数随时间变化规律
Fig. 10 Time-dependent variation of interaction coefficients in the corner zone of mortar and concrete

5 结 论

实际工程中混凝土结构表面的毛细吸水过程往往是一个二维甚至三维问题,按实验室一维标准试验方法测得毛细吸水率无法准确反映真实混凝土结构的吸水速度。本文基于非饱和流体理论,建立了混凝土二维毛细吸水细观数值模型,分析了表面局部区域与水源接触和角部区域相邻侧面与水分接触情况下砂浆和混凝土中的水分分布规律,得出的主要结论如下。

(1)当砂浆或混凝土试件表面部分与水分接触时,水分分布呈放射状,相对含水量由接触面至湿润锋逐渐降低。粗骨料的添加导致湿润锋曲折,试件的吸水率降低,ITZ 的存在导致局部区域内混凝土试件的湿润锋高于砂浆试件。

(2)砂浆和混凝土试件的累积吸水曲线呈现明显非线性特征。相同时间内,单位面积累计吸水量随水分接触宽度的增大而减少,二维毛细吸水高度随着水分接触宽度的增加而增加。

(3)建立了相对吸水率 S_R 关于水分接触宽度的函数曲线,用于通过二维毛细吸水试验预测砂浆或混凝土的毛细吸水率。

(4)砂浆和混凝土构件角部区域的二维毛细吸水过程存在交互效应。数值模型计算得到的砂浆和混凝土交互系数分别在 1.50~1.60 和 1.40~1.60 之间。

本文将混凝土毛细吸水过程研究由一维向二维扩展,有助于准确分析真实工程条件下水分对混凝土耐久性的影响规律。然而,混凝土结构在各种复杂环境中还会受到荷载、冻融循环等影响,未来工作尚需考虑各种损伤对混凝土毛细吸水过程的

影响规律以及二维毛细吸水对氯离子侵蚀、碳化等物质传输过程的作用机理。

参考文献(References):

[1] Mengel L, Krauss H W, Lowke D. Water transport through cracks in plain and reinforced concrete-Influencing factors and open questions[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, **254**:118990.

[2] Mu L J, Wang L C, Wang L. Investigation on water absorption of concrete under the coupling action of uniaxial compressive load and freeze-thaw cycles[J]. *Materials and Structures*, 2022, **55**(4):127.

[3] 张 浩,田 霞,顾 鑫,等.基于粗粒化分子动力学的自由水与水化硅酸钙孔隙水冻结模拟[J]. 计算力学学报,2024, **41**(1):194-201. (ZHANG Hao, TIAN Xia, GU Xin, et al. Freezing simulation of free water and water in calcium silicate hydrate based on coarse-grained molecular dynamics[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2024, **41**(1):194-201. (in Chinese))

[4] 王立成,穆林钧,邹 凯.裂缝对混凝土中水分传输影响研究进展[J]. 水利学报,2021, **52**(6):647-658, 672. (WANG Li-cheng, MU Lin-jun, ZOU Kai. Review of research progress on water transport mechanism of cracks within concrete[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(6):647-658, 672. (in Chinese))

[5] Wu L J, Wang Y Z, Wang Y C, et al. Modelling of two-dimensional chloride diffusion concentrations considering the heterogeneity of concrete materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, **243**:118213.

[6] Jin L, Liu M J, Zhang R B, et al. Cracking of cover concrete due to non-uniform corrosion of corner rebar: A 3D meso-scale study[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, **245**:118449.

[7] Hall C. Water movement in porous building materials:IV. The initial surface absorption and the sorptivity[J]. *Building and Environment*, 1981, **16**(3): 201-207.

[8] Xiao J F, Stone H A, Attinger D. Source-like solution for radial imbibition into a homogeneous semi-infinite porous medium[J]. *Langmuir*, 2012, **28**(9): 4208-4212.

[9] Benner E M, Petsev D N. Potential flow in the presence of a sudden expansion: Application to capillary driven transport in porous media[J]. *Physical Review E*, 2013, **87**(3):033008.

[10] Hallaji M, Sepp nen A, Pour-Ghaz M. Electrical resistance tomography to monitor unsaturated moisture flow in cementitious materials[J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, **69**:10-18.

- [11] Voss A, Hänninen N, Pour-Ghaz M, et al. Imaging of two-dimensional unsaturated moisture flows in uncracked and cracked cement-based materials using electrical capacitance tomography[J]. *Materials and Structures*, 2018, **51**(3): 68.
- [12] Van Belleghem B, Montoya R, Dewanckele J, et al. Capillary water absorption in cracked and uncracked mortar—A comparison between experimental study and finite element analysis [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, **110**: 154-162.
- [13] Liang K, You C, Li X G, et al. Study on two-dimensional capillary water rise in cracked and uncracked cement based materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, **265**: 120310.
- [14] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. *Physics*, 1931, **1**(5): 318-333.
- [15] Li X X, Chen S H, Xu Q, et al. Modeling the three-dimensional unsaturated water transport in concrete at the mesoscale[J]. *Computers & Structures*, 2017, **190**: 61-74.
- [16] Chen D S, Yang K K, Hu D L, et al. A meso-stochastic research on the chloride transport in unsaturated concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, **273**: 121986.
- [17] Meng Z Z, Liu Q F, Xia J, et al. Mechanical-transport-chemical modeling of electrochemical repair methods for corrosion-induced cracking in marine concrete[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2022, **37**(14): 1854-1874.
- [18] Walraven J C, Reinhardt H W. Concrete mechanics. Part A: Theory and experiments on the mechanical behavior of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading[J]. *Nasa Sti/recon Technical Report N*, 1981, **82**: 25417.
- [19] 吴宇航, 肖映雄, 徐亚飞. 基于 Python-Abaqus 的混凝土三维细观随机模型的建立[J]. *计算力学学报*, 2022, **39**(5): 566-573. (WU Yu-hang, XIAO Ying-xiong, XU Ya-fei. Establishment of mesoscopic stochastic models of concrete in three dimensions based on Python-Abaqus[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, **39**(5): 566-573. (in Chinese))
- [20] Li X X, Xu Q, Chen S H. An experimental and numerical study on water permeability of concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, **105**: 503-510.
- [21] 穆林钧. 非饱和混凝土中水分二维传输的试验和细观数值模拟[D]. 大连理工大学, 2022. (MU Lin-jun. Experimental Study and Mesoscale Numerical Simulation on Two-dimensional Transport of Water in Unsaturated Concrete [D]. Dalian University of Technology, 2022. (in Chinese))
- [22] Yang L, Liu G J, Gao D Y, et al. Experimental study on water absorption of unsaturated concrete: w/c ratio, coarse aggregate and saturation degree[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, **272**: 121945.

Mesoscopic method for simulating the two-dimensional capillary water absorption process of concrete

WANG Li-cheng*, YIN Hong-jie, ZOU Kai

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: When the local zone of a concrete member or adjacent sides of the corner position are exposed to moist environment, water will ingress into the concrete interior in the form of two-dimensional capillary absorption, which is a process distinct from one-dimensional water movement. Based on the unsaturated flow theory, in this paper a mesoscopic method for simulating the two-dimensional capillary water absorption process of concrete is developed. The numerically simulation results show that as the localized zone of concrete surface exposed to moisture source decreases, the depth of capillary water absorption decreases for the same elapsed time. However, there is an increasing tendency in the cumulative water absorption per unit area. It is also found that coarse aggregate and the interfacial transition zone (ITZ) can locally inhibit and promote the two-dimensional capillary water absorption process of concrete, respectively. With help of the numerical simulation results, the relationship between sorptivities of the one-dimensional and two-dimensional capillary absorption is established, and the interaction effect of capillary water absorption process in the corner zone of a concrete member is quantitatively investigated.

Key words: concrete; two-dimensional capillary water absorption; mesoscopic method; numerical simulation; sorptivity