

基于孔隙分形特征的水泥基毛细吸力预测模型

童富果^{1,2}, 蔡文婧^{1,2}, 薛松^{1,2}, 刘刚^{1,2}, 李东奇³

(1. 三峡大学水电工程施工与管理湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046)

摘要:为深入理解水泥基毛细吸力与含水量的关系,采用分形几何学方法和毛细管理论提出了考虑孔隙分形特征的水泥基毛细吸力预测模型。该模型通过建立分形模型参数与试样配合比的拟合关系,实现了不同配合比水泥基毛细吸力的快速预测。基于相对湿度法开展了水泥基孔径分布测量验证试验,结果表明:不同配合比(水、灰、砂)水泥基试样孔隙均具有明显分形特性,可用 Menger 海绵体分形模型较好描述;毛细吸力模型预测结果与验证试验测试结果的偏差主要集中在 $\pm 20\%$ 以内,模型可以较为准确地预测水泥基毛细吸力与含水量的关系。

关键词:水泥基;孔隙分形特征;毛细吸力;相对湿度法

中图分类号:TV431

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)06-0027-07

Prediction model of capillary suction in cement-based materials based on pore fractal characteristics//TONG Fuguo^{1,2}, CAI Wenjing^{1,2}, XUE Song^{1,2}, LIU Gang^{1,2}, LI Dongqi³ (1. Hubei Key Laboratory of Hydropower Engineering Construction and Management, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: To gain an in-depth understanding of the relationship between capillary suction and moisture content in cement-based materials, a prediction model for capillary suction in cement-based materials considering pore fractal characteristics was developed based on the fractal geometry approach and the capillary theory. This model establishes a fitting relationship between the fractal model parameters and the sample mix proportion, enabling rapid prediction of capillary suction for cement-based materials with different mix proportions. Verification experiments measuring pore size distribution were conducted based on the relative humidity method. The results indicate that samples with different mix proportions (water, ash, and sand) exhibit significant fractal characteristics, which could be well described by the Menger sponge fractal model. The deviation between the predicted results of the capillary suction model and the experimental test results was mainly within $\pm 20\%$, demonstrating that the model can accurately predict the relationship between capillary suction and moisture content in cement-based materials.

Key words: cement-based material; pore fractal characteristics; capillary suction; relative humidity method

水泥基材料是岩土工程中使用最为广泛的一种建筑材料,其使用寿命受到了广泛关注。大部分水泥基材料(如混凝土)的耐久性问题(冻融、碳化、离子侵蚀等)与非饱和孔隙中水的迁移及水溶性盐离子的传输密切相关^[1-2]。准确预测水泥基材料中的水分迁移过程对水利、岩土工程材料的耐久性评价具有重要意义^[3-4]。孔隙水迁移主要受外部水压力和内部毛细吸力共同驱动,外部水压力与环境有关,

而内部毛细吸力受材料孔隙结构和含水状态的影响^[5-6]。在涉水工程中水面之上或临近水面的水泥基材料多处于非饱和状态,毛细作用主导了水分迁移过程;而毛细吸力与含水量的关系是研究水分传输规律的关键^[7-8]。

获取毛细吸力-含水量曲线的方法主要有压力板法、滤纸法、热电偶湿度计法、蒸汽平衡法、渗析法等,这些试验方法主要用于测试土体毛细吸力,测量

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(52209135);国家自然科学基金重点项目(51939004);湖北省自然科学基金项目(2024AFB813)

作者简介:童富果(1972—),男,教授,博士,主要从事水工材料及岩土介质多相流与多场耦合研究。E-mail: tfg@ctgu.edu.cn

通信作者:薛松(1992—),男,讲师,博士,主要从事岩土体多相渗流研究。E-mail: xuesong@ctgu.edu.cn

的毛细吸力范围多在兆帕级以内^[9]。致密的岩石或水泥基在低饱和度条件下的毛细吸力可达上百兆帕,难以用传统方法测量^[10]。毛细吸力本质上由孔隙中水气弯曲液面的张力产生,其大小很大程度上受孔隙结构控制,因此部分学者提出通过测试材料孔隙结构并建立孔隙形态与毛细吸力的关系,间接获取毛细吸力-含水量曲线^[11-13]。基于该思路,陶高梁等^[14]研究了不同密实度的孔隙分布特征,提出了一种土水特征曲线拟合分析模型;费锁柱等^[15]提出了基于孔径分布预测土水特征曲线的改进方法;丁小刚等^[16]研究了压实度对重塑土孔隙结构的影响,探讨了土水特征曲线随孔隙结构的演变特征。通过与传统毛细吸力直接测试对比,上述研究充分验证了基于孔隙结构预测毛细吸力这一方法的可靠性。然而总体而言,不论直接测试还是间接预测,目前研究对象主要集中于土体,对水泥基毛细吸力与含水量关系的认识相对不足。

水泥基材料水化过程耗水及水分蒸发是孔隙的主要来源,其孔隙特征是控制材料毛细吸力-饱和度关系的关键。水泥基中孔隙尺寸、形状各不相同,体现了微观孔隙几何结构的复杂性^[17-18]。随着分形几何学在岩土工程中的广泛应用,研究发现多孔介质材料(混凝土、土)的孔径、面积、体积等特征在不同尺度下均表现出了一定的分形特征^[14,19-20]。对于混凝土而言,其孔隙分形特征又与配合比、龄期、养护条件等多种因素相关。以往研究多偏重于材料力学性能劣化与孔隙结构分形特征演变之间的关系。例如:喻乐华等^[21]研究了龄期与水泥石孔结构、分形维数、抗压强度之间的关系;丁自伟等^[22]研究了砂岩基质细观结构,并建立了材料密度、孔隙分形维数与抗压强度的关系;张韦等^[23]从孔隙分形角度分析了掺和料对冻融循环下混凝土孔结构及抗冻性的影响。目前从渗流角度探讨孔隙微观结构对水泥基材料毛细吸力-含水量关系的研究较少,认识相对不足。

水泥基的配合比(水、灰、砂)是影响材料孔隙结构的关键因素之一,其变化对水泥基材料毛细吸力-含水量的关系具有重要影响。本文采用相对湿度法测量并系统研究了水泥基水灰比和砂灰比对孔径分布的影响规律,采用分形几何学方法描述了水泥基试样的孔径分布,并结合毛细管理论提出了考虑孔隙分形特征的水泥基毛细吸力预测模型,通过与试验测试结果的对比对模型进行了验证。

1 毛细吸力模型的理论推导

1.1 基于分形模型的水泥基孔隙特征分析

Menger 海绵体模型是混凝土孔隙特征研究中

广泛采用的一种分形模型^[21]。该模型孔隙结构生成步骤为:①将试样假定为边长为 L 的立方体,其总体积 $V_t = L^3$;②将边长 i 等分,可获得 i^3 个立方体;③随机剔除部分立方体作为孔隙,剩余 j 个立方体;④对剩余立方体重复步骤②和③ k 次,则剩余立方体数量为 j^k ,其边长为 $r = L/i^k$ 。参数 i, j, k 均为定值,其大小与材料孔隙结构相关。确定分形维数是研究孔隙体积分形特性的关键,模型中分形维数的定义为 $D = \lg j / \lg i$ 。Menger 海绵体模型给出的固体体积 V_s 和总孔隙体积 V_p 分别为

$$V_s = r^3 j^k = L^3 r^{3-D} \quad (1)$$

$$V_p = V_t - V_s = L^3 [1 - (r/L)^{3-D}] \quad (2)$$

该模型中孔隙半径(孔径)大于饱水孔隙的临界半径 r^* 的孔隙体积在试样体积中所占的比例 P^* 为

$$P^* = (V_t - V_s^*) / V_t = 1 - (r^*/L)^{3-D} \quad (3)$$

式中 V_s^* 为孔径 r 取值为 r^* 时对应的固体体积,根据式(1), $V_s^* = L^3 r^{3-D}$

非饱和状态下,混凝土内部孔隙由水和空气填充,其所占体积分别为 V_w 和 V_a ,则 $V_p = V_w + V_a$ 。当材料处于亲水状态时,其毛细持水能力受孔隙大小影响,孔隙尺寸越小,毛细持水能力越强;故在脱湿过程中大孔隙首先失水, P^* 又代表气填充的孔隙体积 V_a 与试样体积的比值:

$$P^* = V_a / V_t = n(V_p - V_w) / V_p = n(1 - S_r) \quad (4)$$

其中 $n = V_p / V_t$ $S_r = V_w / V_p$

式中: n 为孔隙率; S_r 为水饱和度。

将式(4)代入式(3),可建立基于分形几何学的 r^*, S_r, n 之间的关系:

$$\lg[1 - (1 - S_r)n] = (3 - D) \lg r^* - (3 - D) \lg L \quad (5)$$

由式(5)可以看出,孔隙分形模型中 $\lg[1 - (1 - S_r)n]$ 与 $\lg r^*$ 之间存在明显线性关系。对于真实水泥基试样而言,若试验获取 S_r 和 r^* 满足上述关系,则水泥基的孔隙具备分形特征,反之则不具备。对任意水泥基试样而言,确定分形维数 D 和参数 L 是确定材料孔隙分形特征的关键,其可通过式(5)中的斜率 $3-D$ 和截距 $(3-D) \lg L$ 求出。

1.2 孔隙结构与毛细吸力的关系

在理想的毛细圆管模型中,毛细吸力 S 与 r^* 和固液气三相界面接触角 θ 有关,可采用 Young-Laplace 方程描述^[19]:

$$S = 2\sigma \cos\theta / r^* \quad (6)$$

式中 σ 为水气界面表面张力。

将式(6)代入式(5),消除 r^* 后,即可建立考虑

孔隙分形的毛细吸力模型:

$$S = \frac{2\sigma\cos\theta}{L} [1 - (1 - S_r)n]^{\frac{1}{D-3}} \quad (7)$$

当试样处于完全饱和状态时($S_r = 1$),由式(7)求得毛细吸力为 $2\sigma\cos\theta/L$,即水泥基试样的进气值;而依据毛细圆管模型,参数 L 可进一步理解为试样的最大孔径。

毛细吸力预测模型包含 σ 、 θ 、 L 、 n 、 D 共 5 个未知参数:表面张力 σ 与温度相关^[24],在恒定温度下通常可近似看作定值(约 0.073 N/m);接触角 θ 与主要材料表面湿润特性、清洁程度、粗糙度以及液体吸湿/脱湿动态过程相关^[25-27],对于脱湿过程 θ 为后退接触角,可假定 $\theta = 0^\circ$;孔隙率 n 可通过饱水试验快速测得;最大孔径 L 和分形维数 D 都与试样材料组分(水灰比、砂灰比)相关。若建立参数 L 或 D 与试样材料组分的关系,即可快速预测水泥基试样毛细吸力与饱和度的关系。

2 水泥基孔隙结构测试试验

2.1 孔径分布的测试方法

相对湿度法是一种间接测试多孔介质孔径分布的方法,其基于孔隙中水气界面水分子热力学运动平衡假定。该方法将水泥基孔隙简化为直径各异的毛细圆管模型,并考虑了毛细管内水气界面处液态水和水蒸气相态转变的过程。一方面,液态水变为水蒸气时,增大了蒸汽压力;另一方面,蒸汽压力的增大加速了气态水凝结为液态水的过程,最终形成液态水-蒸汽相变平衡态。该平衡状态可采用 Kelvin 方程描述^[11]:

$$R_H = \exp[-2\sigma M/(\rho_l R T r^*)] \quad (8)$$

式中: R_H 为孔隙相对湿度; M 为水的摩尔质量, $M = 0.018 \text{ kg/mol}$; ρ_l 为水的密度, $\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$; R 为气体常数, $R = 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$; T 为热力学温度, $T = 293.15 \text{ K}$ 。

式(8)表明孔隙相对湿度和孔径具有一一对应关系,测量水泥基孔隙的相对湿度,即可计算材料内部水气界面所在位置的孔径大小。求解式(8)发现相对湿度随孔径的增大呈非线性增大趋势(图 1):在 $r^* < 200 \text{ nm}$ 的孔隙中相对湿度受水气状态变化的影响显著;而在 $r^* > 200 \text{ nm}$ 的孔隙中,相对湿度大于 0.995,对孔隙含水状态变化不敏感,表明相对湿度法主要适用于测量 200 nm 以下的孔径分布。此外部分学者开展了纳米尺度试验,发现 Kelvin 方程(式(8))和毛细管模型(式(6))在孔径为 2 nm 时仍具有较好的精度^[28-30]。

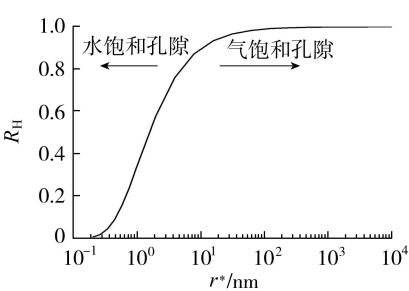


图 1 相对湿度与孔径的关系

2.2 试验设计

为测量水泥基的孔隙相对湿度,设计了如图 2 所示的试验装置,包含水泥基试样、混凝土养护箱、温湿度传感器及数据采集模块(图 2)。水泥基试样为圆柱体,其直径为 5.5 cm,高为 5 cm;试样中心预制有直径 1 cm 的同心圆柱空腔,用于放置温湿度传感器。为避免试样与外界环境产生水分交换,采用可拆卸塑料外壳和密封蜡对试样进行密封处理。空腔与试样孔隙间存在水分子扩散运动,故空腔相对湿度随时间不断变化;当空腔和孔隙中水分子相互扩散达到稳定态时,空腔相对湿度趋于稳定,即认为该测量湿度代表孔隙相对湿度。

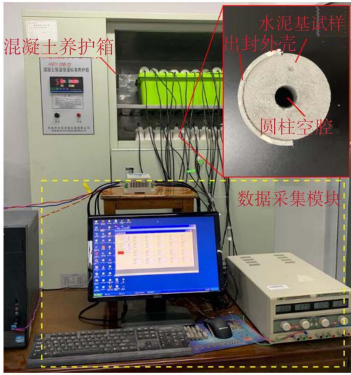


图 2 孔隙相对湿度测量装置和水泥基试样

为探究水泥基的配合比对孔隙结构的影响,设计不同水灰比(0.62、0.55、0.48、0.40)和砂灰比(1.5、2.0、2.5、3.0)的水泥基试样(表 1)。试样所用水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,密度为 3100 kg/m^3 ;砂的细度模数为 2.5 的河沙,密度为 2560 kg/m^3 。

为避免水泥基水化过程中孔隙结构改变对试验的干扰,先将制备好的试样放入混凝土标准养护箱中养护 28 d,再开始孔径分布测试。试验具体步骤如下:①将干燥试样(质量为 m)真空饱水 24 h,而后称量并计算其质量增量 Δm ;②在饱和试样的空腔中放入传感器,而后采用外壳将试样密封处理;③将试样放入养护箱中保持温度为 20°C 、湿度为 95% 的恒定环境,测量空腔湿度随时间的变化,取相对稳定的空腔湿度,即孔隙相对湿度;④拆除密封外壳,采用真

空干燥箱对试样真空低温脱水(约 $\Delta m/10$),而后再再次密封试样;⑤重复步骤③和④直至试样完全烘干。

表 1 水泥基试样的配合比

试样 编号	1 m ³ 水泥基试样中 各组分的质量/kg			水灰比	砂灰比	孔隙率
	水	水泥	砂			
C1	325	524.2	1310.5	0.62	2.5	0.236
C2	300	545.5	1363.6	0.55	2.5	0.223
C3	270	562.5	1406.3	0.48	2.5	0.216
C4	236	590.0	1475.0	0.40	2.5	0.206
S1	380	690.9	1036.4	0.55	1.5	0.254
S2	335	609.1	1218.2	0.55	2.0	0.235
S3	298	541.8	1354.5	0.55	2.5	0.229
S4	270	490.9	1472.7	0.55	3.0	0.224

2.3 试验结果

试验测得的试样相对湿度 R_H 与脱水体积 V 的关系见图 3。脱水初期 ($V < 5$ mL),大孔隙 ($r^* > 200$ nm) 首先失水,相对湿度对试样含水量变化不敏感,其值始终接近 1。随着脱水量进一步增大, $r^* < 200$ nm 的孔隙开始依次脱水,导致了相对湿度迅速下降。宏观上看,与砂灰比相比,水灰比变化对脱水过程的影响更为明显。试样脱水体积一方面与孔径分布有关,另一方面也受试样孔隙率的影响。为排除孔隙率对结果分析的干扰,后续采用水饱和度 $S_r = (\Delta m - \rho_l V) / \Delta m$ 这一无量纲参数代替脱水体积 V 。

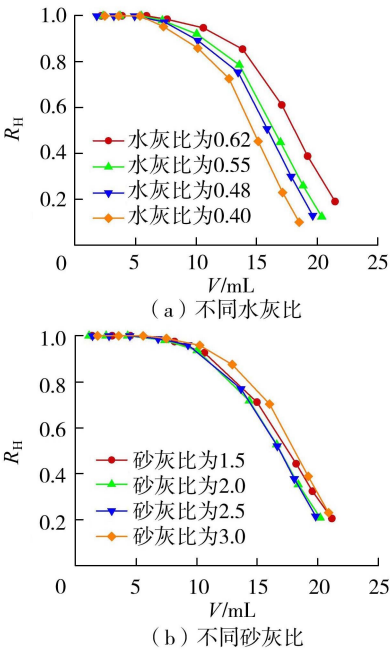


图 3 不同水灰比和砂灰比条件下相对湿度与试样脱水体积的关系

3 结果与分析

3.1 试样孔径分布规律

根据式(8)计算试样在不同含水状态下对应的孔径大小,并绘制了 S_r 与 r^* 的关系曲线(图 4),该

曲线反映了孔径小于 r^* 的孔隙体积在总孔隙体积中所占的比例。水泥水化过程耗水和孔隙水蒸发是水泥基材料孔隙产生的重要原因;水灰比越小,水泥颗粒表面水膜越薄,水化后留下的孔隙越细密,故随着试样水灰比的减小,小孔隙占比越来越高。当水灰比为 0.62 时, $r^* < 70$ nm 的孔隙约占孔隙体积的 2/3,表明微孔隙在水泥基孔隙中占主导;而当水灰比减小至 0.40 时, 2/3 体积的孔隙集中于孔径 20 nm 以下。砂灰比的增大本质上增大了试样的粗颗粒占比,总体而言有利于大孔隙的产生;然而大孔隙会被水泥浆液填充,限制了孔径的变化。当砂灰比由 1.5 增大至 3.0 时, $S_r \approx 0.66$ 处孔径从 41 nm 增大到了 95 nm。

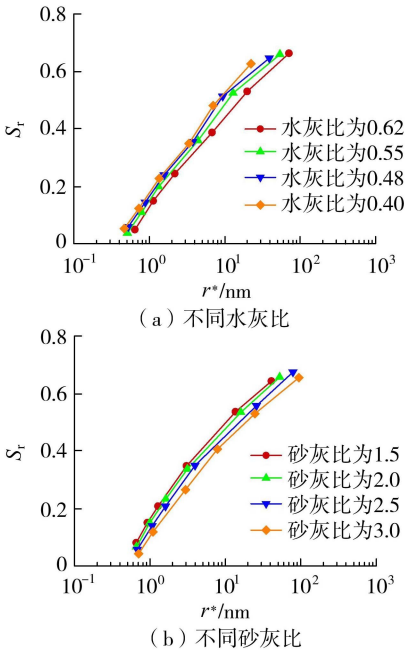


图 4 不同水灰比和砂灰比条件下试样饱和度与孔径的关系

3.2 孔隙分形特征

将图 4 给出的水饱和度与孔径的对应关系代入式(5),并对数据进行线性拟合分析,结果如图 5 所示。线性拟合结果(表 2)与试验数据具有较高的相关性($R^2 > 0.98$),表明 $\lg[1 - (1 - S_r)n]$ 与 $\lg r^*$ 之间存在明显的线性关系,可认为水泥基的孔隙结构具有良好的分形特征,且可用 Menger 海绵体模型较好描述。

分形模型参数取值结果如表 2 所示,水泥基试样的孔隙分形维数集中在 2.96 附近,该结果与韦江雄等^[31-32]基于压汞试验获得的混凝土孔隙体积分形维数的相一致,表明该测试系统能够较好地获取水泥基材料的孔隙体积分布特征。最大孔径主要集中在百纳米级范围,此处所指最大孔径主要针对水化过程耗水产生的微孔隙,而实际水泥基材料搅拌制备过程中会伴随空气的卷入、滞留,产生更大的气孔^[31]。

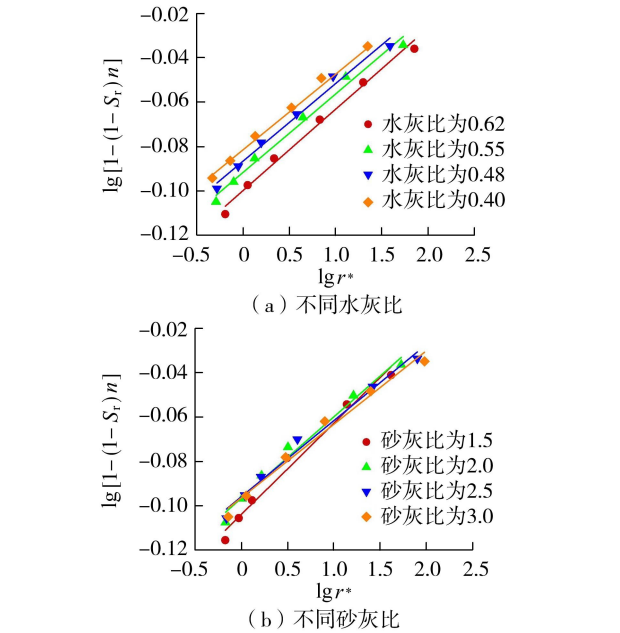


图5 不同水灰比和砂灰比条件下水泥基试样孔隙的分形特征

表2 海绵体分形模型取值结果

试样编号	线性拟合表达式	R^2	D	L/nm
C1	$y=0.0361x-0.0997$	0.991	2.9639	578
C2	$y=0.0354x-0.0915$	0.988	2.9646	384
C3	$y=0.0350x-0.0864$	0.987	2.9650	294
C4	$y=0.0341x-0.0813$	0.997	2.9659	238
S1	$y=0.0412x-0.1039$	0.984	2.9588	332
S2	$y=0.0368x-0.0966$	0.984	2.9632	421
S3	$y=0.0343x-0.0959$	0.986	2.9657	625
S4	$y=0.0332x-0.0964$	0.983	2.9668	801

为预测不同配合比条件下水泥基试样毛细吸力与饱和度的关系,进一步分析了分形维数、最大孔径随水灰比、砂灰比的演变特征,结果图6所示。由式(3)和式(4)可知,分形维数主要受试样孔隙率 n 和孔径比 r^*/L 两方面的影响。从孔隙率的角度看,其大小在0~1之间,因此分形维数的取值范围在0~3之间,且分形维数越大代表试样孔隙率越小。在试验中,随着水灰比增大或砂灰比的减小,孔隙率均呈增大趋势(表1),相应的分形维数呈减小趋势;分形维数随水灰比呈近似线性变化,而随砂灰比呈对数函数变化;最大孔径随水灰比或砂灰比的增大均呈线性增大趋势。

3.3 水泥基试样毛细吸力预测

将图6所示分形几何模型参数(D/L)与材料配合比的关系式代入式(7),即可建立不同配合比条件下毛细吸力-饱和度关系预测模型。基于试验测试孔径数据计算的毛细吸力与模型预测的毛细吸力的区别如图7所示。总体而言,计算毛细吸力与饱和度的关系近似服从对数函数关系,可采用毛细吸力模型进行良好的预测。大部分数据集中在 $\pm 20\%$

偏差范围内,表明该模型能够较好地估计水泥基毛细吸力随配合比的演变关系。

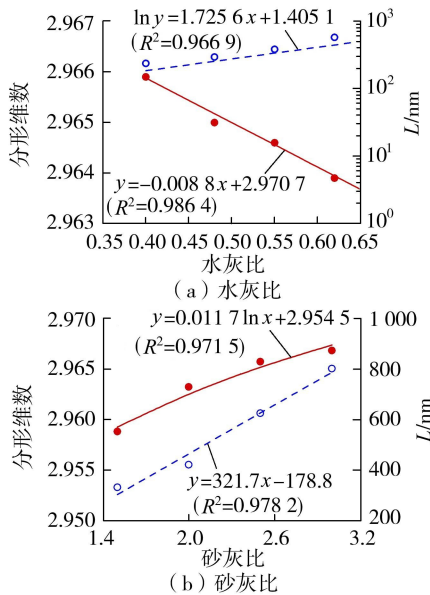


图6 水泥基配合比对孔隙分形参数的影响

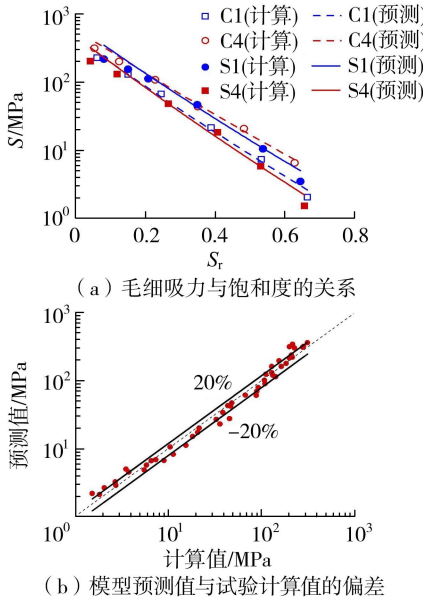


图7 毛细吸力模型预测与试验计算结果对比

在低毛细吸力和高毛细吸力情形下,模型预测结果偏差呈现增大趋势,其原因可能在于本文模型中尚未考虑孔隙的类型。气孔、毛细孔、凝胶孔因成因不同,可能表现出不同的分形特性^[31]。韦江雄等^[31]指出,水泥基材料孔隙包括试样制备过程中空气卷入产生的气孔和水泥水化耗水产生的毛细孔,其分界为 $r = 50 \sim 100 \text{ nm}$,对应吸力为 $1.5 \sim 3 \text{ MPa}$,恰位于低吸力情形下偏差趋势较大区间。水泥矿物在与水发生化学物理作用时也会产生凝胶孔($r < 10 \text{ nm}$)^[32],且随着孔隙减小,凝胶孔占比增大,因而模型在高吸力情形下同样产生了偏差;故在基于分形模型预测吸力时,有必要通过多套分形模型参数

分段描述和预测吸力变化^[31]。此外,本文采用的水泥基试样仅考虑了水、灰、砂的配合比,未考虑掺和料的影响,但不同掺和料种类对孔隙结构的影响差异较大^[21,23],工程应用中还需结合材料、配比具体研究。

4 结 语

基于分形几何学方法描述了水泥基孔隙结构特性和脱水过程孔隙水的分布规律,结合毛细管理论提出了不同含水状态下水泥基毛细吸力的预测模型;采用相对湿度法分析了水泥基孔径分布,发现微孔隙在试样孔隙中占主导地位,占总孔隙体积的2/3以上。水泥基孔隙孔径分布具有明显的分形特性,可采用 Menger 海绵模型较好描述,其分形维数主要集中在 2.96~2.97 之间;进一步量化了分形模型参数(分形维数、最大孔径)随水泥砂浆配合比的演变规律,结合模型实现了对不同配合比水泥基毛细吸力的快速预测。宏观上模型预测值与试验计算值对比的偏差在±20%以内,验证了模型预测的可靠性。

参考文献:

[1] 彭艳周,高军,徐港,等. 盐冻融环境下钢筋混凝土结构锈蚀寿命预测[J]. 水利水电科技进展,2019,39(3): 44-49. (PENG Yanzhou, GAO Jun, XU Gang, et al. Prediction for corrosion life of reinforced concrete structures under salt freeze-thaw environment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019,39(3):44-49. (in Chinese))

[2] 张开来,沈振中,甘磊. 水泥基材料溶蚀试验研究进展[J]. 水利水电科技进展,2018,38(6):86-94. (ZHANG Kailai, SHEN Zhenzhong, GAN Lei. Advances in cement-based materials leaching test [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2018,38(6):86-94. (in Chinese))

[3] 李明超,冯达,张梦溪,等. 碾压混凝土层间水分非饱和传输试验与数值分析[J]. 水利学报,2022,53(1):86-97. (LI Mingchao, FENG Da, ZHANG Mengxi, et al. Experimental and numerical analysis of unsaturated water transfer of RCC layers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022,53(1):86-97. (in Chinese))

[4] 胡钰泉,胡少伟,李文昊,等. 养护条件对 BCCP 抗氯离子侵蚀性能的影响与比较分析[J]. 防灾减灾工程学报,2023,43(3):559-567. (HU Yuquan, HU Shaowei, LI Wenhao, et al. Influence and comparative analysis of curing conditions on chloride resistance of BCCP [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023,43(3):559-567. (in Chinese))

[5] YANG Lin, LIU Guojian, GAO Danying, 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.

[6] ZHAO Haitao, DING Jian, HUANG Yuyu, 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.

[7] WANG Licheng, UEDA T. Mesoscale modeling of water penetration into concrete by capillary absorption [J]. Ocean Engineering, 2011,38(4):519-528.

[8] TONG Fuguo, JING Lanru, ZIMMERMAN R W. A fully coupled thermo-hydro-mechanical model for simulating multiphase flow, deformation and heat transfer in buffer material and rock masses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010,47(2):205-217.

[9] NAM S, GUTIERREZ M, DIPLAS P, et al. Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils [J]. Engineering Geology, 2010,110(1/2):1-10.

[10] MOGHADAM A, VAISBLAT N, HARRIS N B, et al. On the magnitude of capillary pressure (suction potential) in tight rocks [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020,190:107133.

[11] 张庆章,顾祥林,张伟平,等. 混凝土中毛细压力-饱和度关系模型[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(12):1753-1759. (ZHANG Qingzhang, GU Xianglin, ZHANG Weiping, et al. Model on capillary pressure-saturation relationship for concrete [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012,40(12):1753-1759. (in Chinese))

[12] 姚海林. 关于基质吸力及几个相关问题的一些思考 [J]. 岩土力学, 2005,26(1):67-70. (YAO Hailin. Some considerations about the concept of matric suction and questions related to matric suction [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(1):67-70. (in Chinese))

[13] TONG Fuguo, JING Lanru, TIAN Bin. A water retention curve model for the simulation of coupled thermo-hydro-mechanical processes in geological porous media [J]. Transport in Porous Media, 2012,91(2):509-530.

[14] 陶高梁,陈银,袁波,等. 基于 NMR 技术及分形理论预测 SWRC [J]. 岩土工程学报, 2018,40(8):1466-1472. (TAO Gaoliang, CHEN Yin, YUAN Bo, et al. Predicting soil-water retention curve based on NMR technology and fractal theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018,40(8):1466-1472. (in Chinese))

- [15] 费锁柱,谭晓慧,董小乐,等. 基于土体孔径分布的土水特征曲线预测[J]. 岩土工程学报,2021,43(9):1691-1699. (FEI Suozhu, TAN Xiaohui, DONG Xiaole, et al. Prediction of soil-water characteristic curve based on pore size distribution of soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9):1691-1699. (in Chinese))
- [16] 丁小刚,马丽娜,蒯文博,等. 非饱和和重塑弱膨胀土孔隙结构与土-水特征曲线试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41(增刊1):3081-3090. (DING Xiaogang, MA Lina, LIN Wenbo, et al. Experimental study on the pore structure and soil-water characteristic curve of unsaturated remolded weak expansive soil [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Sup1):3081-3090. (in Chinese))
- [17] 董作超,夏军武,段晓牧,等. 基于徐州矿区煅烧煤矸石细集料活性的砂浆孔结构研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(4):819-825. (DONG Zuochao, XIA Junwu, DUAN Xiaomu, et al. Pore structure of fine aggregate mortar based on the activity of calcined coal gangue from Xuzhou mining area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4):819-825. (in Chinese))
- [18] WU Kai, SHI Huisheng, XU Linglin, et al. Microstructural characterization of ITZ in blended cement concretes and its relation to transport properties [J]. Cement and Concrete Research, 2016, 79:243-256.
- [19] 徐永福,董平. 非饱和土的水分特征曲线的分形模型[J]. 岩土力学,2002,23(4):400-405. (XU Yongfu, DONG Ping. Fractal models for the soil-water characteristics of unsaturated soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(4):400-405. (in Chinese))
- [20] HE Chunhui, LIU Chao. Fractal dimensions of a porous concrete and its effect on the concrete's strength [J]. Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering, 2023, 21(1):137-150.
- [21] 喻乐华,欧辉,段庆普. 掺珍珠岩水泥石孔分形维数及其与孔结构、强度的关系[J]. 材料科学与工程学报,2007,25(2):201-204. (YU Lehua, OU Hui, DUAN Qingpu. Research on pore volume fractal dimension and its relation to pore structure and strength in cement paste with perlite admixture [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2007, 25(2):201-204. (in Chinese))
- [22] 丁自伟,李小菲,唐青豹,等. 砂岩颗粒孔隙分布分形特征与强度相关性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(9):1787-1796. (DING Ziwei, LI Xiaofei, TANG Qingbao, et al. Study on correlation between fractal characteristics of pore distribution and strength of sandstone particles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(9):1787-1796. (in Chinese))
- [23] 张韦,刘超,刘化威,等. 基于孔体积分形维数的稻壳灰混凝土冻融损伤劣化机制[J]. 复合材料学报,2023,40(8):4733-4744. (ZHANG Wei, LIU Chao, LIU Huawei, et al. Freeze-thaw damage deterioration mechanism of rice husk ash concrete based on pore volume fractal dimension [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(8):4733-4744. (in Chinese))
- [24] LI Xiaoxia, ZHAO Ling, HE Jihuan. Temperature-dependent capillary rise and its effects on fabric cleaning and permeability [J]. Thermal Science, 2023, 27(3):1915-1920.
- [25] HAN Chunyu, HE Jihuan. Effect of fabric surface's cleanliness on its moisture/air permeability [J]. Thermal Science, 2021, 25(2):1517-1521.
- [26] POPOV V L, LYASHENKO I A, STARCEVIC J. Shape of a sliding capillary contact due to the hysteresis of contact angle: theory and experiment [J]. Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering, 2021, 19(2):175-185.
- [27] XUE Song, YANG Zhibing, HU Ran, et al. Splitting dynamics of liquid slugs at a T-junction [J]. Water Resources Research, 2020, 56(8):e2020WR027730.
- [28] MALIJEVSKÝ A, JACKSON G. A perspective on the interfacial properties of nanoscopic liquid drops [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2012, 24(46):464121.
- [29] YANG Qian, SUN P Z, FUMAGALLI L, et al. Capillary condensation under atomic-scale confinement [J]. Nature, 2020, 588(7937):250-253.
- [30] VINCENT O, MARGUET B, STROOCK A D. Imbibition triggered by capillary condensation in nanopores [J]. Langmuir, 2017, 33(7):1655-1661.
- [31] 韦江雄,余其俊,曾小星,等. 混凝土中孔结构的分形维数研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2007,35(2):121-124. (WEI Jiangxiong, YU Qijun, ZENG Xiaoxing, et al. Fractal dimension of pore structure of concrete [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 35(2):121-124. (in Chinese))
- [32] 张庆章,方燕,宋力,等. 混凝土孔结构及其分形维数与氯离子扩散性能的关系[J]. 硅酸盐通报,2022,41(8):2716-2727. (ZHANG Qingzhang, FANG Yan, SONG Li, et al. Relationship between pore structure, fractal dimension and chloride diffusion performance of concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(8):2716-2727. (in Chinese))

(收稿日期:2023-11-11 编辑:俞云利)