

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2024.12.005

基于 Comsol Multiphysics 的半浸泡非饱和水泥基材料水分输运数值模型研究

张梦媛¹, 丁龙亭¹, 王选仓², 谢金生², 王孜健¹

(1. 山东高速集团有限公司创新研究院, 济南 250000; 2. 长安大学 公路学院, 西安 710064)

摘要: 我国西部荒漠区盐渍土分布广泛, 由可溶性硫酸盐导致的道路基层拱胀破坏已不容忽视。文中采用 Comsol Multiphysics 软件, 基于多相流理论进行浸润状态下非饱和水泥稳定类混合料水分输运数值模拟研究, 以毛细压力作为水相输运驱动力、以饱和蒸气压作为水气相传输驱动力推导了非饱和多孔介质内水相和湿空气相动力控制方程及蒸发控制方程, 建立了考虑蒸发作用的半浸泡非饱和混合料水分输运模型。依据水分传输试验得到了 3 种不同级配类型水稳碎石混合料毛细吸收特性, 验证了模型的准确性。结果表明, XM 结构毛细吸收系数最大, 为 0.09 g/cm^2 ; GK 次之, 为 0.085 g/cm^2 ; GM 的毛细吸收系数最小; 对于非饱和多孔介质来说, 前期孔内流体的对流作用主要是由水分毛细传输引起的, 后期由于蒸汽压差的存在孔隙内水气对流较为强烈; 半浸泡下非饱和水稳基层混合料内部盐分的传输不能忽视水分毛细作用及水分蒸发引起的对流作用的影响。研究结果完善了非饱和介质水分传输理论, 并为探究水-盐在非饱和水泥基材料内部的迁移传输及数值模型的建立提供了参考。

关键词: 土木工程; 水泥基材料; 非饱和介质; 水分传输; 数值模拟

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)12-045-12

Numerical model of water transport in partially-immersed unsaturated cement-based materials using Comsol Multiphysics

ZHANG Mengyuan¹, DING Longting¹, WANG Xuancang², XIE Jinsheng², WANG Zijian¹

(1. Innovation Research Institute of Shandong Hi-speed Group Co., Ltd., Ji'nan 250000, P. R. China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China)

Abstract: Saline soils are widely distributed in the desert regions of western China, where road base deformation due to soluble sulfate poses a significant issue. Using multiphase flow theory, this study conducts a numerical simulation of water transport in unsaturated cement-based mixtures under infiltration conditions with Comsol Multiphysics software. The model considers capillary pressure as the driving force for water phase transport and saturated vapor pressure as the driver for both water and gas phase transport. Dynamic and evaporation governing

收稿日期: 2024-01-16

基金项目: 交通运输部交通运输行业重点科技项目(2018-MS1-025); 新疆交通运输厅科技项目(2019-ZD1-009)。

Supported by Key Science and Technology Project of Transport Industry of Ministry of Transport(2018-MS1-025), and the Science and Technology Project of Xinjiang Transportation Department (2019-ZD1-009).

作者简介: 张梦媛(1995—), 博士, 工程师, 主要从事特殊地区路面工程材料、绿色低碳道路方向研究, (E-mail) zmyy2018@163.com。

通信作者: 丁龙亭, 博士, 工程师, (E-mail) dltphd2018@163.com。

equations for the water and wet air phases in unsaturated porous media are derived, forming the basis of a water transport model for partially-immersed unsaturated mixtures that accounts for water and wet air evaporation. Capillary absorption characteristics of three types of cement-stabilized materials are obtained through water transport testing, and model accuracy is verified against experimental results. Findings show that the capillary absorption coefficient is the highest for XM (0.09 g/cm^2), followed by GK (0.085 g/cm^2), and lowest for GM. In unsaturated porous media, fluid movement in pores is mainly driven by capillary water transport in the early stages, with later stages dominated by convective effects due to vapor pressure differences. These results highlight the critical influence of water capillary and evaporation on soluble salt transport in partially-immersed unsaturated cement-based mixtures. This research advances understanding of water transport in unsaturated media and provides a foundation for exploring water-salt transport in such materials and establishing numerical models.

Keywords: civil engineering; cement-based material; unsaturated porous media; water transport; numerical modeling

我国西部荒漠区干旱少雨,盐渍土分布广泛,自 2015 年之后开始频繁出现路面结构层上拱现象^[1-2],严重影响道路服务水平和行车安全,现有研究表明土基及路基中的可溶性盐分对水泥稳定类基层的影响不容忽视^[3-4]。可溶性盐分在道路结构层内部无法单独传输,必须依靠液态水作为输运介质,遵循“盐随水走、水去盐留”的规律;同时,在实际工程中道路基层很难处于饱水状态,在这种非饱和状态下,水分在基层内部的输运以毛细作用为主。因此,研究水分在非饱和多孔介质内的输运规律及数值模拟是探究水-盐在水泥基材料内侵蚀及迁移模型的基础。目前,对于非饱和多孔介质内水分(气)输运数值模拟理论主要包括:理查德方程^[5]、多相流^[6]及多孔介质中的湿空气场^[7]。何玲丽等^[8]建立了基于混合模式的理查德方程有限元模型,编制了 Matlab 数值模拟程序,进行非均质土体一维、二维渗流有限元数值模拟,表明该模型在满足质量守恒的条件下能够准确模拟非均质土体渗流。贺新光等^[9-10]以二维 Richard's 方程模拟水流在非饱和多孔介质中的输运过程,提出了一种自适应多尺度有限元方法,并通过试验结果证明了该方法的有效性。Wei 等^[11]基于 2 个耦合的 Richard's 方程建立了边坡双重渗透模型。胡黎明等^[12]根据非饱和土多相输运特征,建立了水-气-污染物(非水相流体)的输运模型,以离心模型试验模拟污染物在非饱和土中的输运过程。孙冬梅等^[13]应用 Newton-Raphson 迭代法,建立了非饱和土中水-气二相输运三维模型,分析了降雨入渗条件下土坝中水、气流动状态,结果表明,水-气二相模型能更加真实地反映降雨入渗时的非稳定渗流。蔡沛辰等^[14]基于工业 CT 扫描和水平集方法,进行了非饱和花岗岩残渣土的细观水-气两相驱替模拟,将非饱和土中水流输运过程简化为水在下渗的过程中驱替空气的两相流问题。多孔介质湿空气相在研究食品工程蒸发问题中广泛应用^[15-16],张大鹏^[17]基于 Comsol Multiphysics(以下简称 Comsol)软件建立了苹果切片的多相多孔介质模型,并依据多物理场耦合方程进行数值求解。

综上所述,理查德方程以孔隙内的水为研究主体,并可设置多孔介质内部无法排出的残余储水相,该方程多用于模拟地下水在土壤内的渗流问题^[18],同时可考虑毛细作用、吸湿作用及重力作用。多孔介质中的湿空气场适用于非浸润状态,其研究主体为水、气(包括湿空气及干空气),更适用于考虑水分蒸发作用,无法考虑毛细作用。多相流理论将多孔介质孔隙分为水相及湿空气相,既可用于考虑水分毛细作用,也可模拟重力及蒸发作用。因此,文中综合考虑水分毛细作用、蒸发及重力作用的影响,推导出了三相多孔非饱和介质水气动力控制方程,并进行水气输运数值模拟:使用毛细压力作为水相输运驱动力,通过使用饱和蒸气压作为水气相传输驱动对非饱和多孔介质内水相及湿空气相蒸发控制方程进行了推导,创新性地建立了考虑蒸发作用的非饱和介质内水分输运模型。通过水分传输试验验证了模型的准确性,完善了非饱和介质水分传输理论,得到了非饱和多孔介质内流体的达西速度大小及场分布,掌握了水分在非饱和水泥基材料内的迁移渗流规律。

1 非饱和水稳碎石混合料水分传输室内试验

文中参考美国材料与测试协会制定的混凝土毛细吸收系数试验规程,设计了水泥稳定碎石混合料毛细吸收试验。首先,将水稳碎石混合料试件 105 °C 烘干至恒重,再把试件顶面和四周用环氧树脂胶密封,保证仅有底面与溶液接触,构成溶液一维传输;同时,设置 1 组对照试验,以研究包含蒸发作用的半浸泡试件毛细吸水特性,对照组试件的侧面采用环氧树脂胶密封,预留顶面为水分蒸发面,每间隔一定时间测量试件质量。传统试验试件与水的接触形式包括底层接触、水平接触和顶层接触,因为 3 种试验方式起主导作用的均为多孔材料的毛细管力,通常结果差别不大,为方便试验且能更好地还原道路基层工作状态,文中采用底层接触式。

采用 $\Phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的圆柱体试件,为尽量减小毛细水对水泥水化的影响,采用养生龄期 90 d 的试件进行试验,对悬浮密实结构(XM)、骨架密实结构(GM)及骨架空隙结构(GK) 3 种不同级配类型的混合料在室温下的毛细吸收性能进行对比研究,3 种结构类型混合料集料合成级配如表 1 所示。浸泡溶液为饮用水,浸泡高度为试件总高度的 1/10,即 15 mm,试验过程如图 1 所示。混合料毛细吸收系数计算公式如式(1)(2)所示,即为试件单位横截面积吸水质量与时间方根曲线的斜率。

$$\frac{W(t)}{S_b} = S \sqrt{t}, \quad (1)$$

$$S = \phi \rho \sqrt{\frac{r \gamma \cos \theta}{2\mu}}, \quad (2)$$

式中: S 为毛细吸收系数; $W(t)$ 为吸水质量, g; S_b 为试样横截面积, cm^2 ; ϕ 为混合料孔隙率, %; ρ 为水的密度, 取 1 g/cm^3 ; r 为毛细管半径, cm; γ 为水的表面张力, $\gamma_{(\text{水}, 20^\circ\text{C})} = 0.0728 \text{ N/m}$; θ 为毛细管壁与液体接触角; μ 为液体黏度, $\mu_{(\text{水}, 20^\circ\text{C})} = 1.003 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 。

表 1 3 种结构类型混合料集料合成级配

Table 1 Aggregate gradation of three different-structure mixtures

筛孔尺寸/mm	XM			GM			GK			筛孔尺寸/mm	XM			GM			GK		
	XM	GM	GK	XM	GM	GK	XM	GM	GK		XM	GM	GK	XM	GM	GK	XM	GM	GK
31.5	100	100	100	16.0	77	—	49	4.75	42	25	14	0.600	11	9	9.0				
26.5	—	90	78	13.2	70	—	40	2.36	27	20	12	0.300	7	—	3.0				
19.0	85	82	57	9.5	58	45	25	1.18	19	—	11	0.150	4	—	0.6				
												0.075	3	1	0				



(a) 无蒸发



(b) 考虑蒸发作用

图 1 水分一维传输试验

Fig. 1 One-dimensional water transport test

2 考虑蒸发作用的半浸泡非饱和混合料水分输运模型

2.1 三维模型建立

为了还原道路基层实际厚度,建立Φ150 mm×320 mm的圆柱体试件,浸水深度为32 mm。虽然,模型尺寸与水分一维传输试验中的试件尺寸不一样,根据沈春华^[19]的研究结果,试件高度对水分的毛细吸收作用几乎无影响,因此,仍可验证模型的精确性。整个模型采用先底面剖分后沿试件高度方向扫掠的形式进行网格剖分,共划分3万多个网格。三维模型及网格划分如图2所示。

模型中的材料定义包括湿空气、水和水稳碎石混合料。湿空气和水共同构成混合料孔隙结构,表达式如式(3)所示,多孔介质各相分布如图3所示。

$$S_w + S_{mo} = 100\% , \quad (3)$$

式中: S_w 为水分占孔隙的百分比,即为水稳基层混合料的饱和度; S_{mo} 为水汽和空气占孔隙的百分比。

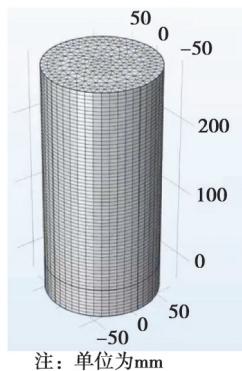


图2 三维模型及网格划分

Fig. 2 3-D model and meshing

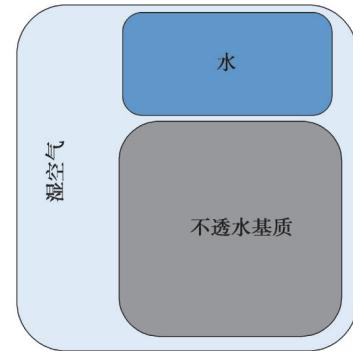


图3 多孔介质相

Fig. 3 Porous medium phase

2.2 数值模拟控制方程

1) 混合料内相输运方程

首先,考虑流场流动带来的对流相,并由对流引起输运迁移,包括水相传输和水汽相传输,在Comsol模型中相输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho_i s_i) + \nabla \cdot \left(-\rho_i \kappa \frac{\kappa_{ri}}{\mu_i} \nabla p_i \right) = 0 , \quad (4)$$

式中: ε_p 为混合料的孔隙率,%; ρ_i 为水相或水汽相的密度,kg/m³; s_i 为水相或水汽相的饱和度;因此, $\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho_i s_i)$ 该项为某单元内单位体积及单位时间水分或湿空气质量的变化。 μ_i 为液体黏度,N·s/m²; p_i 为压力梯度,N/m²; κ 为渗透率; $u_i = \frac{\kappa_{ri}}{\mu_i} \nabla p_i$ 为水或湿空气的迁移速度,是以压力梯度 ∇p_i 结合达西定律计算得到的; $N_i = -\rho_i u = -\rho_i \kappa \frac{\kappa_{ri}}{\mu_i} \nabla p_i$ 为相邻两单元接触面上水或湿空气的质量通量。

在此基础上,进一步考虑水分及水汽重力作用的影响,重力引起的通量为

$$N_g = \rho_i \kappa \frac{\kappa_{ri}}{\mu_i} \rho_i g . \quad (5)$$

最终,得到混合料内流体的相输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho_i s_i) + \nabla \cdot \left(-\rho_i \kappa \frac{\kappa_{ri}}{\mu_i} (\nabla p_i - \rho_i g) \right) = Q_i = 0 , \quad (6)$$

式中: Q_i 为水分或水汽源项。在模型计算时,只需计算水或湿空气的输运即可,另一项可通过体积约束进行

计算, 即: $S_{mo} = 1 - S_w$ 。

2) 达西方程

根据达西方程和质量守恒定律^[20], 得到式(7):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho) + \nabla \cdot (\rho u) = \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho) + \nabla \cdot \left(-\rho \frac{\kappa}{\mu} \nabla p \right) = Q_m。 \quad (7)$$

达西方程中的流体包括水和湿空气两部分, 方程系数由两相性质共同决定。对水分和湿空气两相进行多物理场耦合后得到流体平均密度和平均黏度, 计算公式为

$$\begin{aligned} \bar{\rho} &= \sum_i s_i \rho_{si} \\ \bar{\mu} &= \frac{\bar{\rho}}{\sum_i \kappa_{rsi} \rho_{si}}。 \end{aligned} \quad (8)$$

多物理场耦合作用下输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \sum_i \rho_{si} s_i) + \nabla \cdot \sum_i N_i = 0。 \quad (9)$$

通过达西方程计算可以得到水相及水汽相的达西输运速度。

3) 毛细压力控制方程

该模型中的毛细压力采用 Brooks-Corey 模型进行模拟, 水分和湿空气的相对渗透率如式(10)、式(11)所示^[21]:

$$\kappa_{rsw} = \left(\frac{1}{s_w} \right)^{(3 + \frac{2}{\lambda_p})}, \quad (10)$$

$$\kappa_{rsma} = \frac{1}{s_{ma}}^2 \left(1 - \left(1 - \frac{1}{s_{ma}} \right)^{(1 + \frac{2}{\lambda_p})} \right), \quad (11)$$

式中: λ_p 为孔隙分布指标。

入口毛细管压力初始值 p_{ec} 通过式(12)进行计算, 并作为参数输入模型。

$$\Delta p = \frac{2\gamma \cos \theta}{r}。 \quad (12)$$

利用 Brooks-Corey 模型, 毛细压力通过水分饱和度和毛细管入口压力 p_{ec} 进行计算, 如式(13)所示。

$$p_c = p_{ec} \frac{1}{\left(\frac{1}{s_w} \right)^{\frac{1}{\lambda_p}}}。 \quad (13)$$

将 Brooks-Corey 模型计算出的毛细压力和重力加载至达西场作为流体流动的驱动。毛细压力驱动流体在水稳基层试件上表面出口处的压强改变, 通过设置阶跃函数控制混合料内的毛细压力, 当 $s_w \rightarrow 1$, 即混合料趋于饱和状态时, 混合料内水分对流作用逐渐减弱, 毛细压力逐渐减弱为 0。

4) 蒸发作用控制方程

基于 Dalton 公式, 通过考虑混合料内部和外界环境之间的蒸气压差进行水汽通量即水分蒸发质量的计算, 公式为

$$g_0 = \beta_0 \left[\phi_{w,ext} p_{sat}(T_{ext}) - \phi_w p_{sat}(T) \right], \quad (14)$$

式中: β_0 为水分迁移系数; $p_{sat}(T_{ext})$ 为外部温度为 T_{ext} 时的蒸气压; $\phi_{w,ext}$ 为外部环境湿度; $p_{sat}(T)$ 为内部温度为 T 时的蒸气压; ϕ_w 为混合料内部湿度。

在非饱和水稳基层内部, 由于毛细作用, 毛细水逐渐向上迁移。假设, 某时刻水分迁移高度为 h_1 , 则在 h_1 上部的某段区域内生成大量水汽, 在此引入蒸发质量源, 水汽体积膨胀, 由于蒸气压差逐渐向上迁移, 进一步引发内部流体的对流, 直到水汽到达与空气接触的表面后蒸发扩散至空气中。在 Comsol 模型中, 通过增加水汽蒸发质量源通量 Q_{ev} 实现上述蒸发过程, 蒸发作用控制方程为

$$Q_{ev} = -s_w \cdot \beta_0 \left[\phi_{w,ext} p_{sat}(T_{ext}) - \phi_w p_{sat}(T) \right] \cdot \frac{S_j}{V_j} \cdot s_{ma}, \quad (15)$$

式中: $\frac{S_j}{V_j}$ 为某单元表面积与体积之比。

在模型中提取蒸发控制方程云图,镂空部分为液体浸泡区,如图 4 所示。由图 4 可知,靠近液面的区域水汽蒸发通量最强烈,向上逐渐衰减,可进一步证明蒸发作用控制方程使用的合理性。

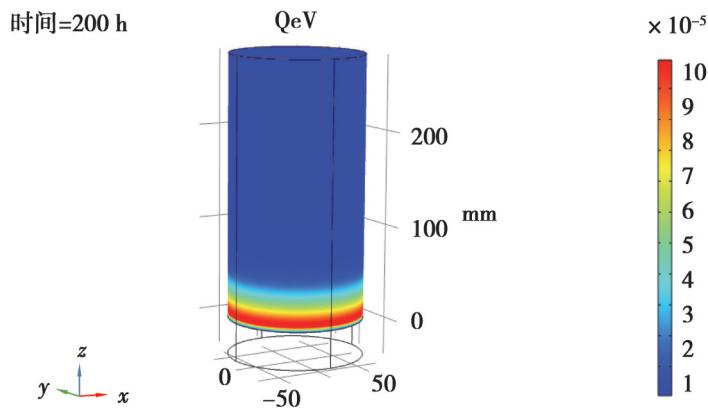


图 4 非饱和多孔介质蒸发云图

Fig. 4 Evaporation simulation results of unsaturated porous media

2.3 边界条件及模型参数设置

模型考虑水分从半浸泡水稳碎石混合料底部向内部传输的过程,图 4 中模型下部镂空部分为试件浸泡区,同时考虑了不预留蒸发面和预留顶面作为蒸发面 2 种情况。当不考虑蒸发作用时,模型侧面和顶面均无通量。考虑蒸发作用时,模型四周无通量,而在顶面设置压强约束,水汽向上输运并在顶面产生质量通量,为了质量通量计算准确,顶面使用弱约束条件,在接口中使用弱约束时,引入拉格朗日乘数作为该接口的附加因变量^[22-23]。对于半浸泡非饱和水稳碎石混合料,0 时刻 S_w 初始值应为 0, 模型中 S_{0s_w} 取 0.01, 防止迭代运算过程中造成方程无解。输入模型中的参数值如表 2 所示。

表 2 输入模型中的参数

Table 1 Parameters used in the model

参数	取值	参数	取值
水的表面张力 γ	0.072 8 N/m	湿润空气密度 ρ_{ma}	1 kg/m ³
孔隙分布指标 λ_p	1	湿润空气黏度 μ_{ma}	1.76e-5 Pa·s
渗透率 κ	4e-16 m ²	水密度 ρ_w	1 000 kg/m ³
初始饱和度 S_{0s_w}	0.01	水黏度 μ_w	0.001 Pa·s

3 结果与讨论

3.1 水分传输试验结果与讨论

通过半浸泡在清水中的水分一维传输试验,得到常温条件下(25 °C)3 种级配混合料试件毛细吸水质量随时间变化的关系如图 5 所示,毛细吸收系数如图 6 所示。由图 5 可以看出,在半浸泡试验条件下,完全干燥的试件吸水质量在前 24 h 内增长速度最快,随着浸泡时间增长,吸水速率逐渐缓慢;XM 结构和 GM 结构在第 144 h 后吸水速率为 0;GK 结构达到平衡的时间最短,121 h 后吸水质量便不再增长。这是由于试件与外界空气接触面均被环氧树脂密封,试验体系与外界环境之间无物质交换,即进入试件内部的水分不会因蒸发而排出体系之外。随着毛细管吸力作用,水分逐渐进入试件内部,但随着毛细上升高度的升高,水稳碎石混合料内的毛细吸收作用逐渐减小,最终达到与毛细水柱的重力相平衡,此时毛细吸收作用已较为微弱。

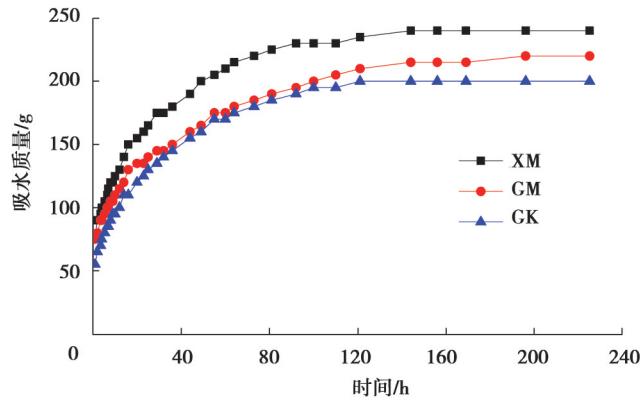


图 5 毛细吸水质量随时间的变化

Fig. 5 Variation of capillary water absorption quality over time

由图 6 可知, 通过拟合得到图形斜率, 即为混合料毛细吸收系数。可以看出, XM 结构的毛细吸收系数最大, 为 0.09 g/cm^2 ; GK 次之, 为 0.085 g/cm^2 ; GM 的毛细吸收系数最小, 为 0.076 g/cm^2 。而 3 种级配混合料的最终毛细吸水质量排序为 XM(240 g) > GM(215 g) > GK(200 g)。由此可知, 虽然 GK 的毛细吸收系数较 GM 大, 前期水分吸收速率相对较快, 但由于 GK 结构毛细孔数量少, 毛细吸收作用弱, 导致最终吸水质量比 GM 少。当离子在水中的扩散系数不变时, 吸水量少, 即可认为迁移至混合料内部的盐离子较少, 对混合料造成的破坏较轻。

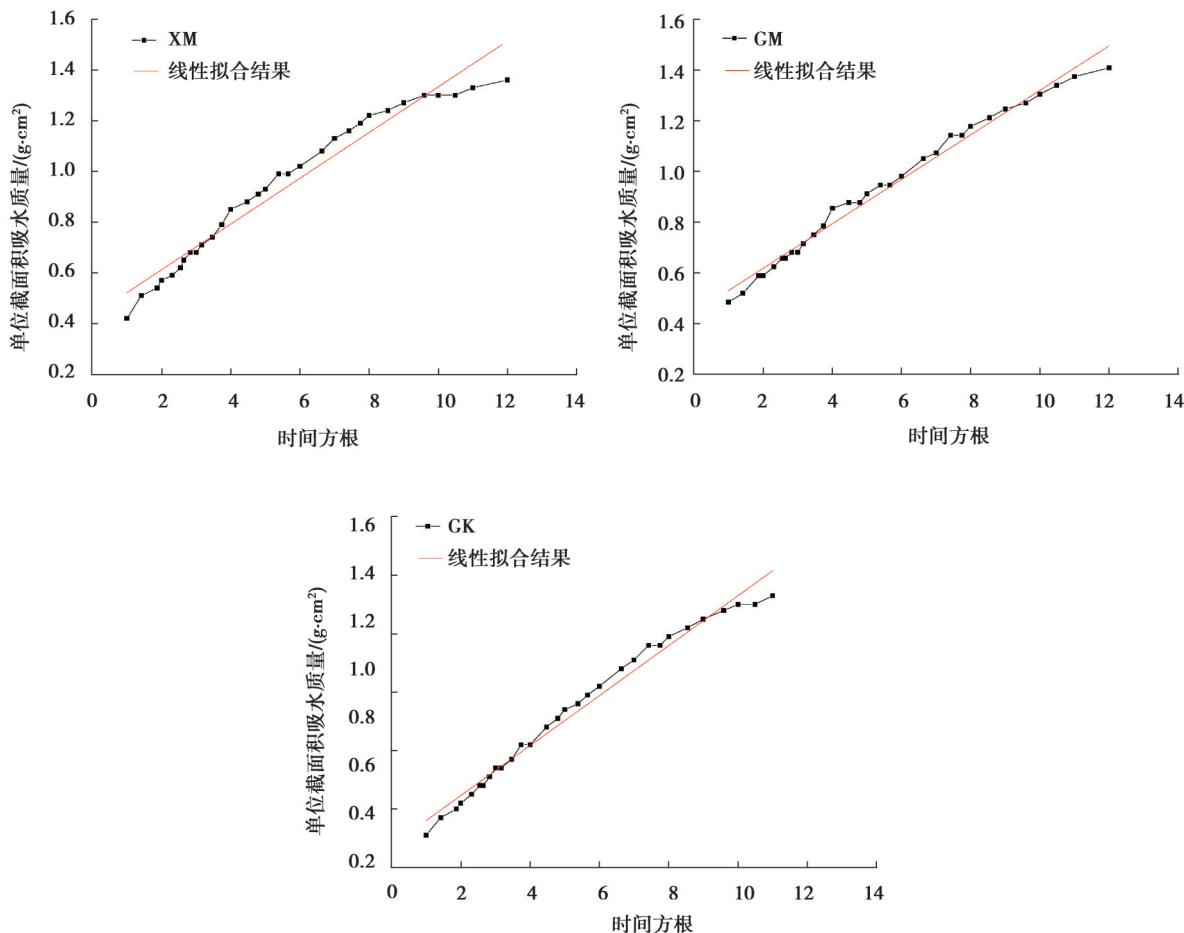


图 6 单位截面积毛细吸水质量随时间方根的变化

Fig. 6 Variation of capillary water absorption mass per unit cross-sectional area over square root of time

考虑蒸发作用时,一维传输试验得到的水分质量随时间的关系如图7(b)所示。由图可知,预留顶面作为蒸发面时,试件毛细吸水质量随时间变化与无蒸发作用下增加趋势基本一致,前期质量增长较快,后期趋于平稳。大约前20 h质量增长曲线与封闭体系下的试验结果一致,说明干燥的混合料初期毛细吸收作用非常强烈;但试验后期由于蒸发作用,吸水质量达到峰值并趋于平缓的时间出现较早,即毛细作用、蒸发作用和毛细水重力达到相对动态平衡的时间较早,且总吸水质量相对全封闭体系降低了约25%。

3.2 模型模拟结果与讨论

1) 模型验证

以水分传输试验结果进行模型验证。采用XM结构在不考虑蒸发作用工况下的吸水质量和3种结构考虑蒸发作用工况下的吸水质量分别进行模型验证。模拟值和实测值如图7所示。

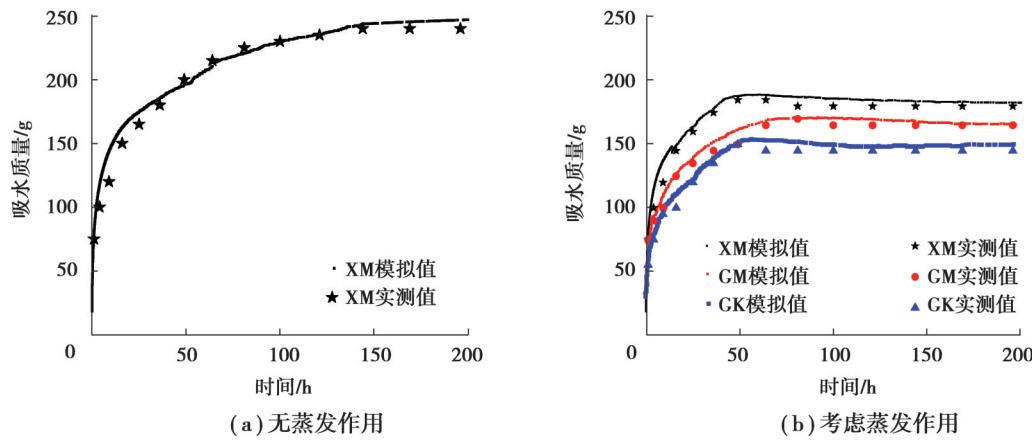


图7 毛细吸水质量模拟值与实测值对比

Fig. 7 Comparison between simulated and measured capillary water absorption quality

由图7可知,不论是否考虑蒸发作用,模拟得到的混合料吸水质量随时间的变化与试验结果基本一致,说明建立的半浸泡非饱和多孔介质内水分输运模型的正确性。值得注意的是,当考虑蒸发作用时,模型模拟结果存在一个吸水质量最大的峰值点位,这主要是由于前期水分毛细吸收作用较强而蒸发作用较弱,但后期毛细作用逐渐减弱而蒸发作用开始增强导致的,最终两者会达到一个平衡状态,但通过室内试验很难准确获得吸水质量的峰值点位。总体来说,建立的模型能够准确模拟水分在混合料内部的传输迁移过程。

2) 数值模拟结果分析与讨论

非饱和状态下混合料孔隙中的流体包括水分和湿空气,可通过模型得到流体达西速度场、水线、孔隙内水体积分数变化情况。图8为非饱和试件内流体达西速度大小及达西速度场分布。由图8(a)(b)可以看出,无论是否考虑蒸发作用,在半浸泡液体(镂空部分)表面上部存在一段达西速度相对较小的区域,150 h时后,高度稳定在40 mm左右,这一段区域对应半浸泡试验中水泥基材料的水膜区^[24-25],该区域饱和度较大,主要发生水分的毛细润湿作用。由图8可以看出,当考虑蒸发作用时,混合料孔隙内流体达西速度场分布密集。第1 h时,是否考虑蒸发作用对流体达西速度影响不大,说明此时由毛细作用引起的流体对流起主导作用,第200 h时,达西速度约为无蒸发作用时的10倍,说明此时蒸发作用主导混合料孔隙内流体的对流作用,这就更好地解释了水分传输试验中考虑蒸发作用时,混合料试件内较早出现吸水质量动态平衡的原因。

图9是GK结构半浸泡200 h时的水线云图及不同级配类型混合料水线高度随半浸泡时间的变化。图中所取的水线为 $s_w = 0.2$ 时的1条等值线,这个值近似于混合料内部润湿状态,可认为水线以上混合料处于干燥状态。通过实际观察润湿混凝土高度和模型水线的对比,可进一步证明模型的准确性。由图9可知,当考虑蒸发作用时,水线高度随时间的变化为先急剧增长,达到峰值后略微降低并最终趋于平稳。这主要是由于水分毛细上升作用随半浸泡时间增长逐渐减弱,而蒸发作用随着半浸泡前期混合料水饱和度上升,有增强后再

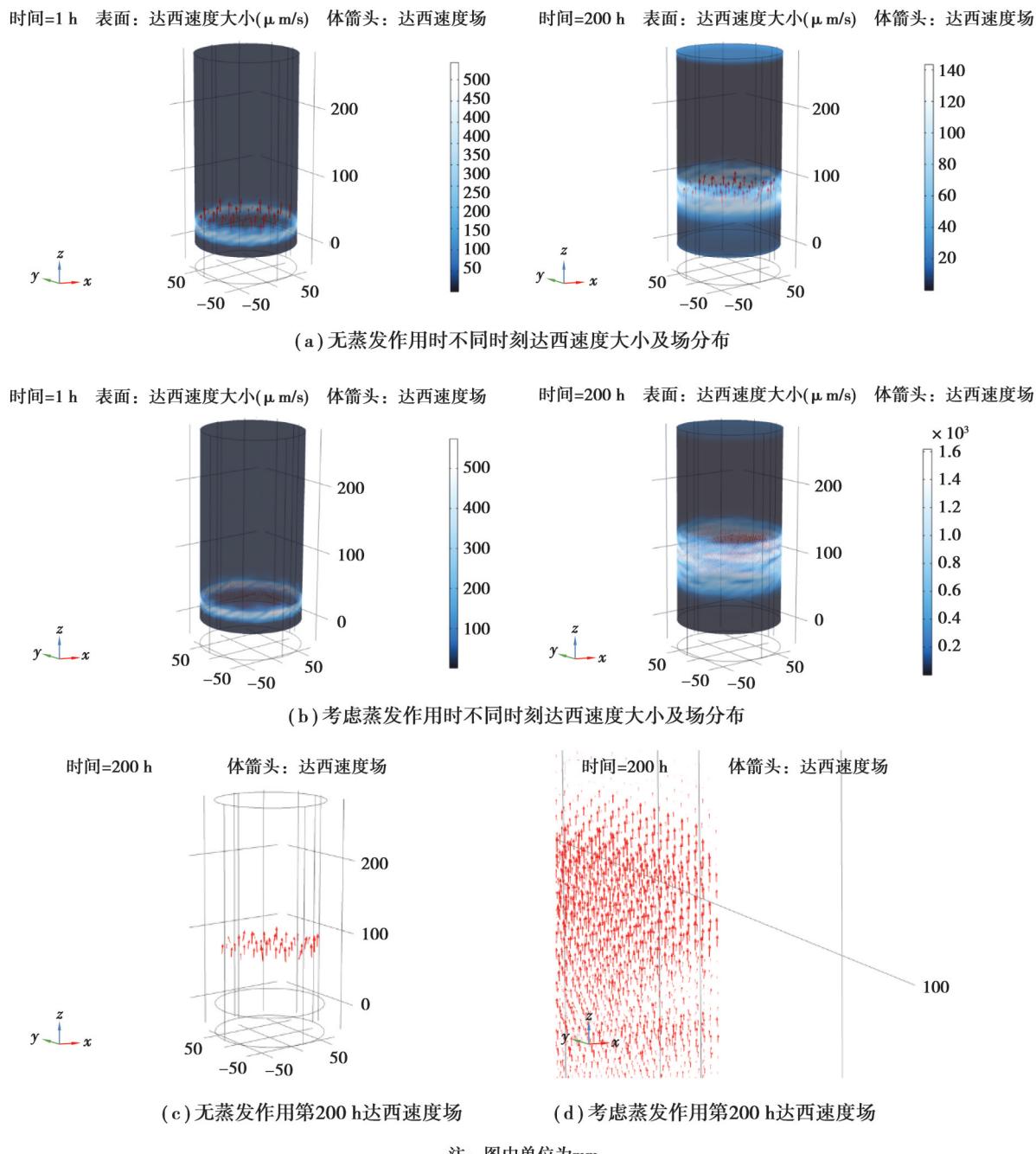


图 8 半浸泡试件内部不同时刻达西速度大小及场分布

Fig. 8 Darcy velocity and field distribution at different time in partially-immersed specimen

逐渐趋于平稳的趋势。因此,在毛细作用由强转弱、蒸发作用由弱较强时(第 50 h),水线高度随时间的变化曲线存在一个最高点;大约半浸泡 150 h 之后,水线高度逐渐达到平衡。150 h 之后,水分在混合料内部的传输极其缓慢,这时在孔隙内部起主导作用的机制为水分蒸发作用,此时,由于蒸气压差引起的流体对流远超过由于毛细压力差引起的毛细作用,因此,图 8(d)中第 200 h 密集的达西速度场占主导作用的是湿空气的输运。当不考虑蒸发作用时,试件的水线高度表现为持续增长,但大于 150 h 后逐渐达到平衡状态,表现为极缓慢的增长。3 种不同级配混合料达到平衡状态时的水线高度与吸水质量大小一致,为 $XM > GM > GK$, 进一步说明 GK 结构的毛细上升作用最弱而 XM 结构毛细作用最强烈。

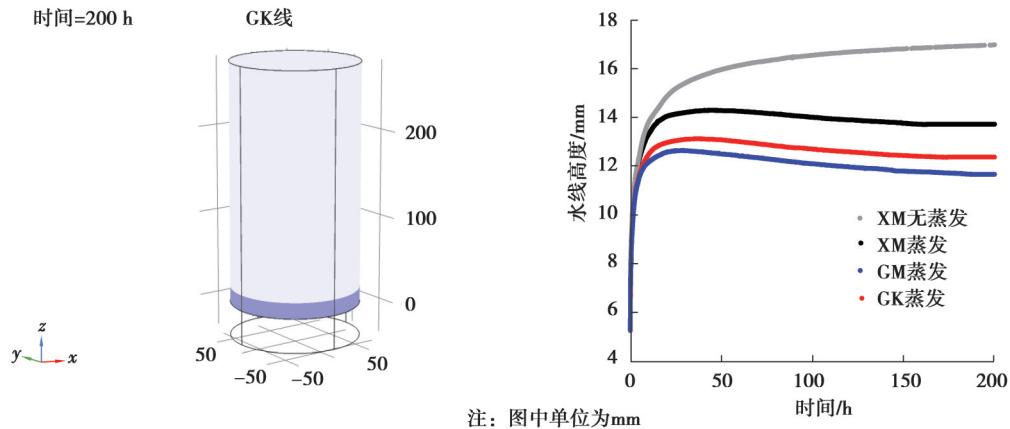


图9 不同级配类型混合料水线高度随半浸泡时间变化

Fig. 9 Variation of waterline height of different gradation mixture with immersion time

水线仅为一条等值线,无法看出混合料孔隙内水饱和度的分布状态。图10为XM结构混合料不同时刻水体积分数,即混合料饱和度的变化。由图10可以看出,不考虑蒸发作用的情况下,水分在混合料内部整体传输速度相对较快。无论是否考虑蒸发作用,在半浸泡前期水分在混合料内部传输速度很快,对于非饱和多孔介质来说,前期的毛细吸收作用在整个水分输运过程中起决定性作用,毛细传输引起的水分对流作用特别强烈。而后期不论是否考虑蒸发作用水分输运速率均较慢,以气态水传输为主。由图8(d)可知,考虑蒸发作用的情况下,后期虽然水分毛细传输速率较慢,但水汽在蒸汽压差下产生较大的达西速度,混合料孔隙内部水汽对流较为强烈。综上可知,水分在非饱和水泥基材料内传输的过程中,流体在混合料内部发生强烈的对流作用,会对盐离子在混合料内部的传输产生促进作用,加速盐离子在多孔介质内部的迁移。因此,研究半浸泡下非饱和水稳基层混合料内部盐分的传输不能忽视水分毛细作用及水分蒸发引起的对流作用的影响。

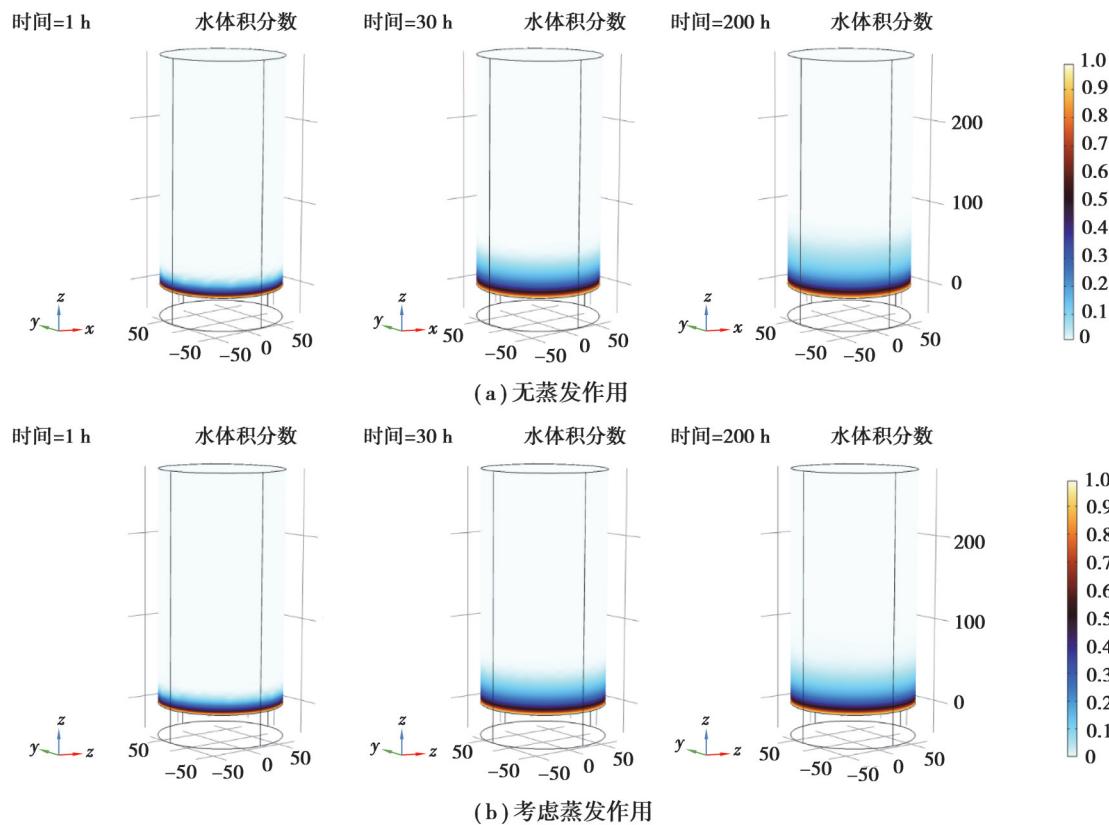


图10 水饱和度分布云图

Fig. 10 Simulation results of water saturation distribution

4 结 论

文中通过试验、理论推导及数值模拟方法, 研究了半浸泡非饱和水稳基层混合料内部水分传输机理及规律, 创新性地考虑了蒸发作用对非饱和介质内水相及湿空气相输运的影响, 主要研究结论如下:

1) 基于 Comsol 有限元软件建立了考虑蒸发作用的半浸泡非饱和水稳碎石混合料水分输运模型, 通过水分输运模型得到的不同级配类型混合料毛细吸水质量与水分传输试验结果吻合, 验证了模型的准确性, 说明模型能够很好地重现水分在非饱和多孔介质内的输运迁移。

2) 不同级配类型混合料的毛细吸收系数不同, XM 结构毛细吸收系数最大, 为 0.09 g/cm^2 ; GK 结构毛细吸收系数较 GM 大, 前期水分吸收速率较快, 但 GK 结构混合料由于毛细孔数量少, 最终吸水质量比 GM 结构小, 毛细吸收作用最弱; 3 种级配混合料最终毛细吸水质量排序为 XM(240 g) > GM(215 g) > GK(200 g)。

3) 水分在非饱和多孔介质内的传输过程中, 前期孔内流体的对流作用主要是由于水分的毛细传输引起的, 后期不论是否考虑蒸发作用水分输运以气态水传输为主, 由于蒸汽压差的存在孔隙内水气对流较为强烈, 会对盐离子在混合料内部的传输产生促进作用。因此, 研究非饱和半浸泡水泥基材料内部盐分的传输不能忽视水分毛细上升及蒸发引起的对流作用的影响。

参 考 文 献

- [1] Wang X C, Zhang M Y, Ding L T, et al. Characterisation of arch expansion of cement stabilised road bases[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2022, 23(5): 1512-1528.
- [2] Song L, Song Z, Wang C H, et al. Arch expansion characteristics of highway cement-stabilized macadam base in Xinjiang, China[J]. Construction and Building Materials, 2019, 215: 264-274.
- [3] 冯瑞玲, 王随柱, 吴立坚, 等. 新疆硫酸盐渍土地区沥青路面鼓胀变形机理研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1739-1745. Feng R L, Wang S Z, Wu L J, et al. Bulging deformation mechanism of asphalt pavement in sulfate saline soil areas of Xinjiang [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9): 1739-1745.(in Chinese)
- [4] 温小平, 翁兴中, 张俊, 等. 道面基层抗硫酸盐侵蚀性能及防范措施[J]. 公路交通科技, 2015, 32(9): 36-40. Wen X P, Weng X Z, Zhang J, et al. Characteristics of sulfate corrosion resistance of pavement base and precaution measures [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(9): 36-40.(in Chinese)
- [5] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Physics, 1931, 1(5): 318-333.
- [6] 陈盼, 魏厚振, 李幻, 等. 多孔介质中两相流动过程的毛细滞回效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2148-2158. Chen P, Wei H Z, Li H, et al. Effect of capillary hysteresis on two-phase flow in porous media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2148-2158.(in Chinese)
- [7] 余冰妍, 邓力, 程芬, 等. 基于多孔介质热/质传递理论的流体—颗粒食品热处理数值模拟研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 209-215. Yu B Y, Deng L, Cheng F, et al. Review of numerical simulation of fluid-particle food thermal processing based on heat and mass transfer theory of porous media[J]. Food & Machinery, 2019, 35(8): 209-215.(in Chinese)
- [8] 何玲丽, 田东方. 基于混合格式 Richards 方程的非均质土体渗流模拟[J]. 水利水运工程学报, 2022(3): 59-65. He L L, Tian D F. Seepage simulation for heterogeneous soil based on the mixed form of Richards' equation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(3): 59-65.(in Chinese)
- [9] 贺新光, 任理. 求解非均质多孔介质中非饱和水流问题的一种自适应多尺度有限元方法: II. 数值结果[J]. 水力学报, 2009, 40(2): 138-144. He X G, Ren L. Adaptive multi-scale finite element method for unsaturated flow in heterogeneous porous media II. Numerical results[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 138-144.(in Chinese)
- [10] 贺新光, 任理. 求解非均质多孔介质中非饱和水流问题的一种自适应多尺度有限元方法: I. 数值格式[J]. 水力学报, 2009, 40(1): 38-45, 51. He X G, Ren L. Adaptive multi-scale finite element method for unsaturated flow in heterogeneous porous media: I. Numerical scheme[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(1): 38-45, 51.(in Chinese)
- [11] Shao W, Bogaard T, Bakker M. How to use COMSOL multiphysics for coupled dual-permeability hydrological and slope stability modeling[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2014, 9: 83-90.

[12] 胡黎明, 邢巍巍, 周小文. 非饱和土中多相流动的试验研究和数值模拟[J]. 工程力学, 2008, 25(11): 162-166.
Hu L M, Xing W W, Zhou X W. Laboratory testing and numerical simulation of multiphase flow in unsaturated soils[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(11): 162-166.(in Chinese)

[13] 孙冬梅, 朱岳明, 张明进. 非饱和带水 - 气二相流数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 560-565.
Sun D M, Zhu Y M, Zhang M J. Study on numerical model for water-air two-phase flow in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 560-565.(in Chinese)

[14] 蔡沛辰, 阙云, 李显. 非饱和花岗岩残积土水-气两相驱替过程数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(6): 54-63.
Cai P C, Que Y, Li X. Numerical simulation of water-gas two-phase displacement process in unsaturated granite residual soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(6): 54-63.(in Chinese)

[15] Ousegui A, Moresoli C, Dostie M, et al. Porous multiphase approach for baking process-explicit formulation of evaporation rate [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 100(3): 535-544.

[16] Halder A, Datta A K. Surface heat and mass transfer coefficients for multiphase porous media transport models with rapid evaporation[J]. Food and Bioproducts Processing, 2012, 90(3): 475-490.

[17] 张大鹏. 苹果切片热风干燥过程中的热湿传递研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2020.
Zhang D P. Study on heat and moisture transfer during hot air drying of apple slices[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2020. (in Chinese)

[18] 徐明江. 非饱和土地基与基础的动力响应研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
Xu M J. Study on dynamic response of unsaturated soil foundation and foundation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010. (in Chinese)

[19] 沈春华, 水中和, 周紫晨. 水泥基材料水分传输及动力学研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(9): 84-87.
Shen C H, Shui Z H, Zhou Z C. Research on water transport and kinetics in cement-based materials[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(9): 84-87.(in Chinese)

[20] 唐勇斌. 多雨地区路基路面饱和-非饱和渗流特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
Tang Y B. Study on saturated-unsaturated seepage characteristics of subgrade and pavement in rainy area[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)

[21] 秦文静. 黄土水力运动参数经验模型参数的传递函数研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2020.
Qin W J. Study on transfer function of empirical model parameters of loess hydraulic movement parameters[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020. (in Chinese)

[22] Masoodi R, Pillai K M. Darcy's law-based model for wicking in paper-like swelling porous media[J]. AIChE Journal, 2010, 56(9): 2257-2267.

[23] 武晓峰, 唐杰, 藤间幸久. 多孔介质三相流中的毛细压力和相对渗透率[J]. 环境科学进展, 1999(5): 68-73.
Wu X F, Tang J, Fujima Yukihisa. Capillary pressure and relative permeability of three phase flow in porous media[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 1999(5): 68-73.(in Chinese)

[24] Liu Z Q, Deng D H, De Schutter G, et al. Micro-analysis of "salt weathering" on cement paste[J]. Cement and Concrete Composites, 2011, 33(2): 179-191.

[25] Bassuoni M T, Rahman M M. Response of concrete to accelerated physical salt attack exposure[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 79: 395-408.

(编辑 陈移峰)