

基于分形理论的毛细水上升高度模型及试验验证

蒋函静, 徐宇冉, 陈志明, 李淑娥, 康峰沂, 徐永福

A model of capillary water rise based on fractal theory and experimental validation

JIANG Hanjing, XU Yuran, CHEN Zhiming, LI Shue, KANG Fengyi, and XU Yongfu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202304055>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

毛细水作用下非饱和土压缩过程的微观非连续变形数值分析

Numerical analysis of evolution of the unsaturated soil micro-structure with capillary action during compression

李强, 李同录, 李华, 沈伟, 李萍, 张常亮 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 135-143

考虑孔隙水微观赋存形态的非饱和粉土有效应力方程及其验证

An effective stress equation for unsaturated silt considering the microstructure of pore water and its verification

曾立峰, 邵龙潭, 牛庚, 郭晓霞 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 37-46

黄土与其矿物颗粒表面水膜类型及其定量表征

Types of water film on the surface of loess and related mineral particles and their quantitative characterization

刘佳婷, 付昱凯, 李同录, 赵晨曦, 李萍, 侯晓坤, 胡向阳 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 105-113

滑源区粒序分布及颗粒粒径对碎屑流冲击作用的影响研究

Particle sequence distribution and the effect of particle size on the impact effect in a fluidized landslide-debris flow

张志东, 樊晓一, 姜元俊 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 49-59

水-岩作用下粉砂质泥岩含水损伤本构模型

Constitutive model of water-damaged silty mudstone under water-rock interactions

李安润, 邓辉, 王红娟, 郑瀚, 苟晓峰, 潘远阳 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 106-113

半干旱地区地表-地下水系统水热运移与裸土蒸发研究

Hydrothermal transfer and bare soil evaporation in surface-groundwater systems in semi-arid areas

马稚桐, 王文科, 赵明, 黄金廷, 卢艳莹, 侯昕悦, 王一 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 7-14



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202304055

蒋函静, 徐宇冉, 陈志明, 等. 基于分形理论的毛细水上升高度模型及试验验证 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 102-109.
JIANG Hanjing, XU Yuran, CHEN Zhiming, et al. A model of capillary water rise based on fractal theory and experimental validation [J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3): 102-109.

基于分形理论的毛细水上升高度模型及试验验证

蒋函静¹, 徐宇冉¹, 陈志明², 李淑娥², 康峰沂², 徐永福¹

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院土木工程系, 上海 200240;
2. 南通公路事业发展中心, 江苏南通 226001)

摘要: 沿海地区的路基工程中, 毛细水上升会产生路基病害, 影响道路运营的安全性和耐久性, 因此研究毛细水上升高度尤为重要。文章视毛细水上升为一种非饱和土的渗流现象, 引入分形维数对非饱和土渗透系数进行修正, 进而提出了基于分形理论的毛细水上升高度模型, 得到了毛细水上升高度随时间变化的曲线; 而后对南通某干线公路路基土样进行竖管法毛细水上升高度试验, 改变土样的干密度及初始粒径的分形维数分布做对照组试验。研究结果表明: 毛细水上升呈现初期先快速增加, 然后缓慢增加, 最终趋于稳定的趋势; 土样颗粒粒径分布的分形维数越大, 得到的毛细水上升高度越大; 土样的干密度越小, 即孔隙率越大, 得到的毛细水上升高度越大。文章提出的毛细水上升高度模型中, 毛细水上升高度与试样孔隙率、饱和渗透系数、进气值对应的毛细水上升高度、分形维数等参数相关。在模型理论值计算中认为分形维数变化仅改变进气值对应的毛细水高度, 不改变饱和渗透系数, 而干密度变化即孔隙率变化仅导致饱和渗透系数变化, 不改变进气值对应的毛细水高度, 由此得到的模型计算结果与试验结果趋势一致, 验证了理论模型的正确性, 可以为公路路基毛细水病害防治提供理论指导。

关键词: 毛细水; 颗粒分布; 分形; 达西定律; 干密度

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)03-0102-08

A model of capillary water rise based on fractal theory and experimental validation

JIANG Hanjing¹, XU Yuran¹, CHEN Zhiming², LI Shue², KANG Fengyi², XU Yongfu¹

(1. Department of Civil Engineering, School of ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Nantong Highway Development Center, Nantong, Jiangsu 226001, China)

Abstract: As to the roadbed projects in coastal areas, capillary water rise can produce roadbed diseases and affect the safety and durability of road operation. It is important to study the capillary water rise height. The article regards capillary water rise as a kind of unsaturated soil seepage phenomenon, and introduces fractal dimension to unsaturated soil permeability coefficient modification. A capillary water rise height model based on fractal theory is proposed to obtain the capillary water rise height curve with time. Then a vertical tube method capillary water rise height test was conducted on a mainline roadbed soil sample in Nantong, with the control test of changes in the dry density of the soil sample and the fractal dimension of the initial particle size distribution. The results show

收稿日期: 2023-04-28; 修订日期: 2023-07-20

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 江苏省交通厅项目(21-1898)

第一作者: 蒋函静(1999—), 女, 博士研究生, 主要从事公路交通方面的科研工作。E-mail: jhj031607@sjtu.edu.cn

通讯作者: 徐永福(1967—), 男, 博士, 教授、博士生导师, 主要从事非饱和土力学方面的科研与教学工作。E-mail: yongfuxu@sjtu.edu.cn

that: the capillary water rise presents a rapid increase at the beginning, and then slowly increases, and finally stabilizes. The larger the fractal dimension of the particle size distribution of soil sample, the greater the capillary water rise height; the smaller the dry density of the soil sample, that is, the greater the porosity, the greater the capillary water rise height. In the capillary water rise height model, the capillary water rise height is related to the sample porosity, saturated permeability coefficient, capillary water rise height corresponding to the inlet value, fractal dimension, etc. In the theoretical model, the variation of fractal dimension only changes the capillary water rise height corresponding to the inlet value, not the saturated permeability coefficient; while the dry density change, i.e., the porosity change, only leads to the saturated permeability coefficient change, does not affect the intake value corresponding to the height of capillary water, the results from theoretical model are consistent with those from the test, verifying the effectiveness of the theoretical model. This study provides theoretical guidance for the prevention and control of road-base capillary water disease.

Keywords: capillary water; particle distribution; fractal theory; Darcy law; dry density

路基工程中的许多病害问题都与路基土的含水率变化有关^[1-2]。其中,地下水发生毛细现象会导致毛细水上升,对路基土体的强度和稳定性有显著的负面影响,导致翻浆、冻胀、车辙等一系列的路基病害^[2-4]。因此,确定毛细水的上升高度,可为减少路基病害、提高公路的使用质量提供相应的参考,具有重要的社会经济意义。

目前,学者们针对毛细水上升高度开展了大量的现场及室内试验研究,取得了一定进展^[5-6]。胡明鉴等^[7]针对钙质砂样分别在连续级配和单一粒径下毛细水高度上升的情况,得出细颗粒含量越多,毛细水上升高度越高的结论;邓改革等^[8]通过对3种粒径范围的砂性土进行室内试验,也证明了毛细水上升高度与砂土粒径的负相关;吕秋丽等^[9]从孔隙结构的角分析砂土、粉土、黏土3种不同孔隙结构土质的毛细水上升规律,指出毛细管细且畅通时,毛细水上升高度更高,反之更低;杨海华等^[10]利用投影寻踪回归计算不同粒组对毛细水上升高度的影响,以获取最优组合帮助胡杨的生态修复;刘杰等^[11]研究饱和渗透系数、初始含水率对毛细作用下路基土湿度变化的影响,说明初始含水率越低、饱和渗透系数越大时,湿度变化越大;朱志锋等^[12]对各类垫层材料进行毛细水处理模型试验,结果表明石灰土加土工膜作为粉土路基毛细水垫层效果较好;Hird等^[13]为了阐明水在初始干燥土壤中的上升程度及其分布进行了毛细水上升试验。随着该问题的深入研究,毛细水上升高度的影响不只停留在定性分析,一系列经验公式被提出:高大钊等^[14]较早提出土层中毛细水上升高度经验公式;董斌等^[15]采用竖管法建立了粗粒土的毛细水最大上升高

度与有效粒径 d_{10} 和孔隙率 n 的拟合公式;杜红普等^[16]根据土水特征曲线,利用有限差分法构建一维非饱和和毛细上升模型,可用于预测砂土的毛细水上升高度;Lu等^[17]在Terzaghi解的基础上提出了毛细水上升高度的理论解并通过试验进行验证。

然而对于毛细水随时间增长而上升整个过程的理论研究极少。分形理论由Mandelbrot等^[18]在1983年首次提出,可以用来描述土颗粒的不规则分布情况。刘松玉等^[19]利用分形理论研究黄土、膨胀土、红土等特殊土的颗粒分布。引入分形理论研究土颗粒分布,表征土壤结构的自相似性,将其考虑到毛细水上升过程中,相较于只考虑单一级配,能够更准确地预测毛细水上升高度及过程,以此提出的理论模型对非饱和土的毛细作用的描述更加符合实际。

本文引入分形维数对非饱和土渗透系数进行修正,进而提出了颗粒分布影响下的毛细水上升高度模型。而后以南通某干线公路路基土为研究对象进行竖管法毛细水上升试验,验证理论模型的正确性,为公路路基毛细水病害防治提供理论指导。

1 毛细水上升高度模型

毛细水上升是一种非饱和土渗流现象,模型的水力边界条件为:水位线在土柱最低端保持稳定,土柱顶端为自由边界。Terzaghi^[20]曾作出两个假设,一是Darcy定律适用于非饱和土,二是可将毛细水上升与水力梯度关系表示为:

$$i = \frac{h_c - z}{z} \quad (1)$$

式中: h_c ——毛细水上升的最大高度/cm;

z ——湿润锋上升高度/cm;

i ——水力梯度。

h_c 代表了毛细水上升的极限高度,在非饱和土水分运动过程中, Darcy 定律与渗透系数和水力梯度相关,取微段土柱 dz ,单位时间内毛细水上升量为:

$$q = ki = n \frac{dz}{dt} \quad (2)$$

式中: q ——单位时间毛细水上升量/cm;

k ——渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$);

n ——孔隙率/%;

t ——时间/s。

渗透系数为常数时,对式(2)积分并利用临界条件,可得到毛细水上升高度与时间的隐式函数^[17]:

$$t = \frac{nh_c}{k} \left[\ln \left(\frac{h_c}{h_c - z} \right) - \frac{z}{h_c} \right] \quad (3)$$

然而,由土-水特征曲线可知,土壤剖面是由饱和区和非饱和区组成,饱和度随高度的增加而降低,渗透系数 k 实际上并不是常数。徐永福等^[21]根据土壤孔隙的分形分布,提出了确定渗透系数随毛细水上升高度的表达式:

$$k = k_s \left(\frac{z}{h_a} \right)^\alpha \quad (4)$$

式中: h_a ——进气值对应的毛细水高度/cm;

α ——与分形维数有关的参数;

k_s ——饱和渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)。

吸力会随着土含水率降低而增加,含水率低到一定程度时气泡开始进入土的孔隙中时,此时对应的吸力即为进气值。 k_s 是饱和渗透系数, α 的大小由表征孔隙分布的分形维数 D 决定,即 $\alpha = 3D - 11$ 。将式(1)、式(4)代入式(3)中,得到式(5):

$$\frac{dz}{dt} = \frac{k_s}{n} \left(\frac{z}{h_a} \right)^\alpha \frac{h_c - z}{z} \quad (5)$$

$$\int \frac{z^{1-\alpha}}{h_c - z} dz = \int \frac{k_s}{nh_a^\alpha} dt \quad (6)$$

考虑到边界条件即当 $t=0$ 时, $z=0$, 积分结果如式(7)所示:

$$\frac{z^{1-\alpha} \left(-1 + \text{Hypergeometric2F1} \left[1, 1-\alpha, 2-\alpha, \frac{z}{h_c} \right] \right)}{-1+\alpha} = \frac{k_s}{nh_a^\alpha} t \quad (7)$$

式中: Hypergeometric2F1——超几何级数,可用式(8)的幂级数定义。

综上,毛细水上升高度随时间变化的方程为:

$$t = -\frac{nh_a^\alpha}{k_s} \frac{z^{1-\alpha} \left(-1 + \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(1)_j (1-\alpha)_j}{(2-\alpha)_j} \frac{(z/h_c)^j}{j!} \right)}{-1+\alpha} \quad (8)$$

$$\text{式中, } (x)_j = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ x(x+1)\cdots(x+j-1) & x > 0 \end{cases}$$

2 毛细水上升高度模型的单参数分析

由式(8)可知毛细水上升高度 z 与孔隙率 n 、饱和渗透系数 k_s 、进气值对应的毛细水高度 h_a 、与分形维数相关的参数 α 相关。考虑到各个参数对于毛细水上升高度的影响程度不同,为了更明显地体现出各个参数的影响权重,特取 $n=50\%$ 、 $k_s=3.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 、 $h_a=40 \text{ cm}$ 、 $D=2.7$ 、 $h_c=100 \text{ cm}$ 作为标准组,对式(8)进行单参数分析。

为探讨孔隙率 n 对毛细水上升高度的影响,分别取 $n=40\%$ 、 50% 、 60% , 如图 1(a)所示。随着 n 增大,毛细水上升高度随之减小。在含水率一定时,孔隙率越小,干密度越大,基质吸力随干密度的增大而增大,孔隙水毛细作用越大,相同时间内毛细水上升高度越大。孔隙率决定了土样孔隙的多少,反映土体中孔隙的连通情况,土的孔隙率变化会导致基质吸力的变化,从而引起毛细水上升高度变化。

为探讨饱和渗透系数 k_s 对毛细水上升高度的影响,分别取 $k_s=2 \times 10^{-5}$ 、 3×10^{-5} 、 $4 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, 如图 1(b)所示。随着 k_s 增大,毛细水上升高度随之增大。渗透系数是反映土壤透水能力大小的系数,其他条件一定的情况下, k_s 越大,单位时间内水分迁移的量越多,土样渗透能力越大,毛细水上升高度越高。

为探讨进气值对应的毛细水高度 h_a 对毛细水上升高度的影响,分别取 $h_a=20$ 、 40 、 60 cm , 如图 1(c)所示。随着 h_a 增大,毛细水上升高度随之增大。土的进气值指空气刚开始进入土中所对应的基质吸力值,是土水特征曲线上的一个特征点。当对土壤施加小于进气值的吸力时,土体气相是封闭的;随着吸力的不断增大,当吸力超过进气值后,空气逐渐进入土体孔隙,从而减缓了毛细水上升的速率。进气值越大,同等含水率条件下的基质吸力越大,毛细水上升高度越高。

为探讨分形维数 D 对毛细水上升高度的影响,分别取 $D=2.3$ 、 2.5 、 2.7 , 如图 1(d)所示。随着 D 的增大,毛细水上升高度随之略微增大。 D 增大意味着土样中细颗粒掺入量增多,黏粒含量变高,土壤结构更加密实,持水能力增加,毛细水上升高度越大。

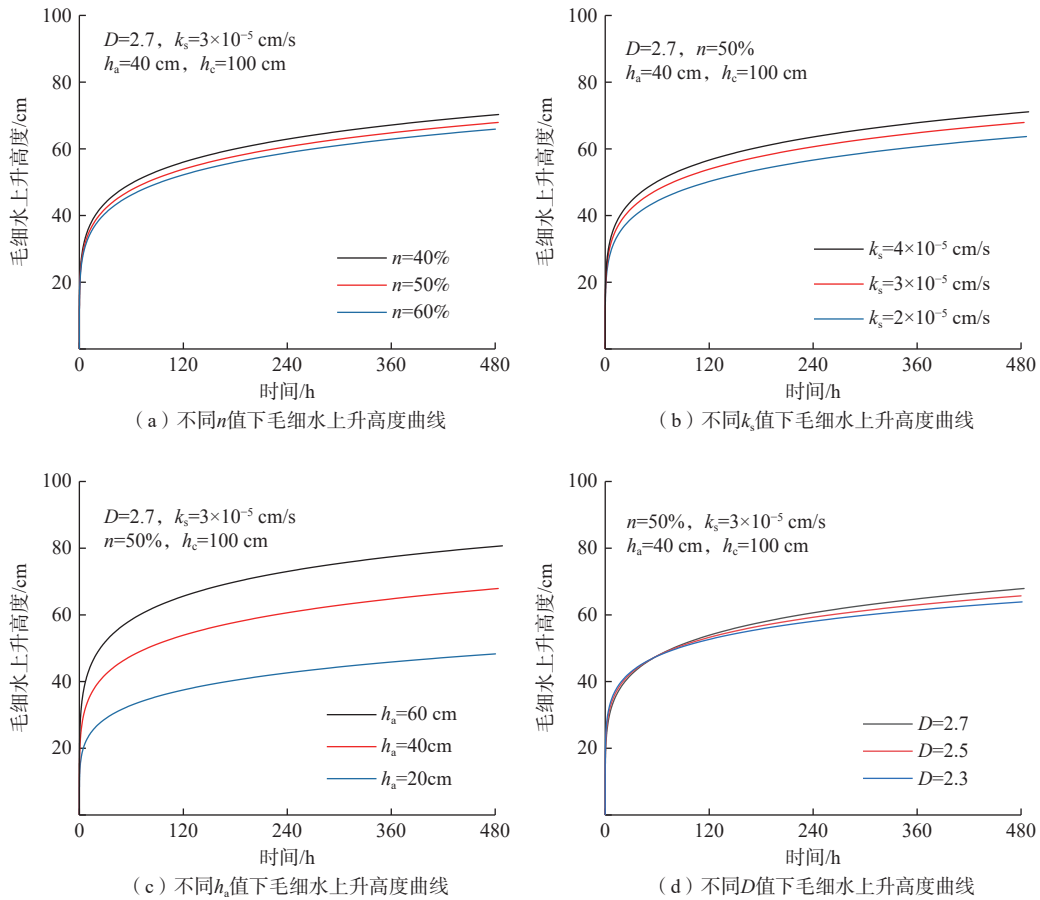


图 1 毛细水上升高度模型单参数分析结果

Fig. 1 Single parameter analysis results of capillary water rise height mode

3 毛细水上升试验

3.1 试验材料

本试验中的土样是从江苏省南通海安市取的重塑土样, 其物理力学性质见表 1 所示。根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2001)^[22], 土的塑性指数 16.2, 则土样为粉质黏土。

表 1 试验土样基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of soil samples

参数	液限/%	塑限/%	塑性指数	比重
取值	35.01	18.82	16.21	2.73

根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[23] 进行毛细水上升高度直接观测法试验, 试验需采用毛细管水上升高度仪, 主要包括: 仪器支架、3 支有机玻璃管及配套的有机玻璃盛水筒、挂绳挂簧、橡胶管、止水夹等。有机玻璃管的内径为 4 cm, 有效长度为 100 cm, 由下至上标有刻线, 一次性可同时进行 3 组试样, 如图 2 所示。

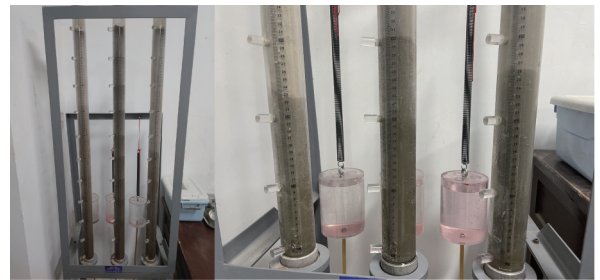


图 2 竖管法测量毛细水上升高度

Fig. 2 Using the vertical tube method to measure the capillary water rise height

3.2 试验方案

试验用土为南通海安自然风干土样, 天然含水率 1%, 故试样的初始含水率即为 1%, 土样颗粒粒径均在 2 mm 以下。为了探究毛细水上升高度的影响因素, 特设计对照试验如表 2 所示, 第 1、2、3 组土样的干密度均为 1.30 g/cm³, 研究不同分形维数下的颗粒粒径分布对毛细水上升的影响; 第 1、4、5 组土样粒径分布一致, 研究不同初始干密度对毛细水上升的影响。

对于分形分布的颗粒, 颗粒个数 N 和粒径 d 之间

表 2 试验方案
Table 2 Experimental schemes

组号	干密度/(g·cm ⁻³)	分形维数
1	1.30	2.7
2	1.30	2.5
3	1.30	2.3
4	1.35	2.7
5	1.40	2.7

满足关系^[24]:

$$N = Cd^{-D_1} \quad (9)$$

式中: C ——系数;

D_1 ——粒径分布分形维数。

试验中统计颗粒数目计算分形维数往往很困难,需要基于数目的分布转化为质量的分布,颗粒质量与 d 之间满足关系:

$$\frac{M(d)}{M_T} \propto d^{3-D_1} \quad (10)$$

式中: $M(d)$ ——粒径小于 d 的颗粒质量/g;

M_T ——颗粒总质量/g。

已有理论表明^[25],颗粒具有相同体积时,可认为孔隙分布分形维数 D 等于粒径分布分形维数 D_1 。故可通过筛分得到孔隙分布。为了得到孔隙分布分形维数分别为 2.3、2.5、2.7 的试样,需要进行配土。按照图 3 所示的各粒径组百分比取土,再将各粒径组土颗粒均匀混合,即可得到分形维数为 $D=2.3$ 、2.5、2.7 的试样。

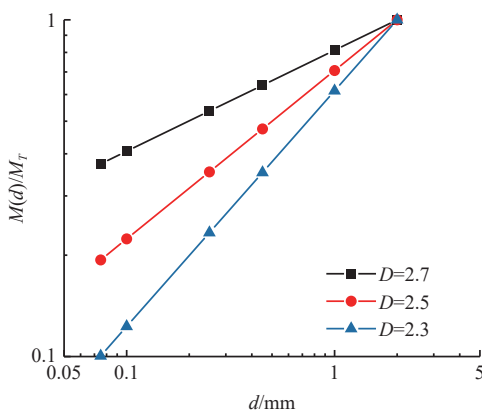


图 3 土样级配特征
Fig. 3 Grading of soil samples

试验过程中,保持水位线在土柱最低端且不变,土柱顶端为自由边界。可以直接以土柱的颜色深浅变化肉眼读出管壁干湿分离界面的高度。记录读数时间及毛细水高度,得到毛细水上升高度与时间的关系曲线。需要注意的是,在试验初期,毛细水上

升较快,需要频繁读数,随着试验进行,读数频率逐渐变低。

4 毛细水上升试验结果及理论验证

4.1 毛细水上升试验结果

将观测到的毛细水上升高度随时间的变化绘制成图,图 4 为相同干密度不同分形维数条件下毛细水上升高度曲线,图 5 为相同分形维数不同干密度条件下毛细水上升高度曲线,土样干密度与孔隙率存在对应关系,干密度为 1.30、1.35、1.40 g/cm³ 对应的孔隙率分别为 52.3%、50.5%、48.6%。初期毛细水上升速率在整个过程中最快,可达 2 cm/h 左右,随后逐渐减缓,在 300 h 左右增长已经非常缓慢,逐渐趋于稳定。从水土特征曲线解释该现象的原因:土柱初始比较干燥,基质吸力很大使得毛细水快速上升。之后,土样的含水率随时间逐渐增大,基质吸力渐渐减小,使得毛细水上升速率逐渐变小。

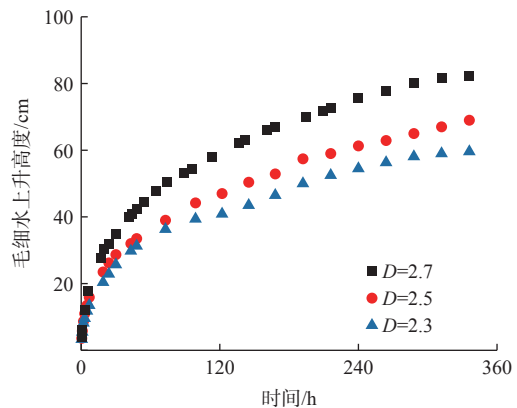


图 4 不同分形维数下的毛细水上升高度曲线
Fig. 4 Capillary water rising height curves of different fractal dimension

4.2 毛细水上升高度模型的理论验证

从图 4、图 5 中的试验结果来看,很明显与第 1 节图 1 中单参数分析的理论结果不同。4.1 节中的单参数分析是建立在其余几个参数完全不变的情况下进行的,仅仅是对毛细水上升高度模型各参数影响程度的一种较为直观的分析。而在实际试验设计中,干密度发生改变即孔隙率改变势必会引起饱和渗透系数以及进气值的改变,而分形维数发生改变即颗粒粒径分布改变也是如此。

由于毛细水上升高度模型中的参数互相影响,试验验证极为困难,已有研究表明分形维数 D 与进气值对应毛细水高度 h_a 有着紧密的联系。当 D 逐渐增大,

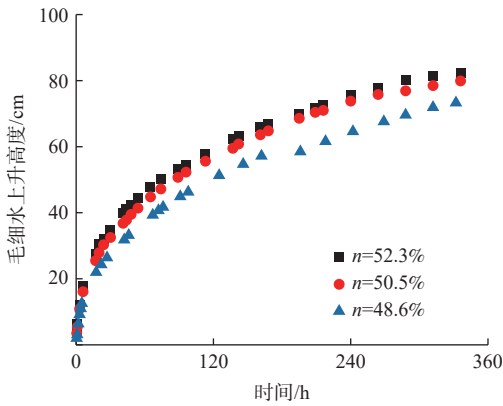


图 5 不同干密度下的毛细水上升高度曲线

Fig. 5 Capillary water rising height curves of different dry density

随着土样中细颗粒掺入量的增加, 孔隙结构更加密实, 颗粒之间基质吸力变大, h_a 随之增加^[26]; 而孔隙率 n 与饱和渗透系数 k_s 也存在一定的关系, n 越大, k_s 越大, 且在 $\lg k-e$ 函数图像的直线斜率接近 $0.5e_0$ (e 为孔隙比, e_0 为初始孔隙比)^[27-28]。对此本文提出一种简化思路, 即认为 D 变化仅改变 h_a , 不改变 k_s ; 而 n 变化仅导致 k_s 变化, 不改变 h_a 。由于粉质黏土的渗透系数范围值是 $1.2 \times 10^{-6} \sim 6.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, h_a 取值范围是 $30 \sim 60 \text{ cm}$, 故理论模型参数取值如表 3 所示。

表 3 理论参数取值

Table 3 Theoretical parameter values

组号	孔隙率/%	$k_s/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	D	h_a/cm
1	52.3	3.5×10^{-5}	2.7	60
2	52.3	3.5×10^{-5}	2.5	45
3	52.3	3.5×10^{-5}	2.3	30
4	50.5	2.8×10^{-5}	2.7	60
5	48.6	2.0×10^{-5}	2.7	60

将表 3 中的参数代入至毛细水上升高度模型中, 得到理论曲线与试验结果对比, 如图 6、图 7 所示。图 6 中, D 及 h_a 增大均使毛细水上升高度更大, 与图 1(b)(d) 相比, D 变化进而引起 h_a 变化的作用较为明显; 图 7 与图 1(a)(c) 相比, 虽然单参数分析中孔隙率增大会使毛细水上升高度减小, 但是孔隙率变大引起的饱和渗透系数增加会使毛细水上升高度增加, 从试验结果来看两种作用中饱和渗透系数的作用较为明显。模拟结果与试验结果趋势一致, 验证了模型的准确性。

5 结论

(1) 提出基于分形理论的毛细水上升高度模型,

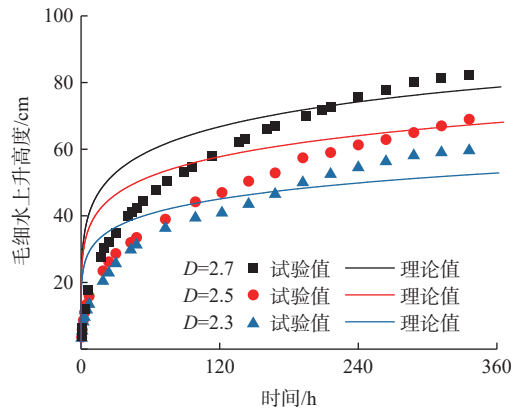


图 6 不同分形维数下的试验、理论对比曲线

Fig. 6 Experimental and theoretical comparison curves of different fractal dimensions

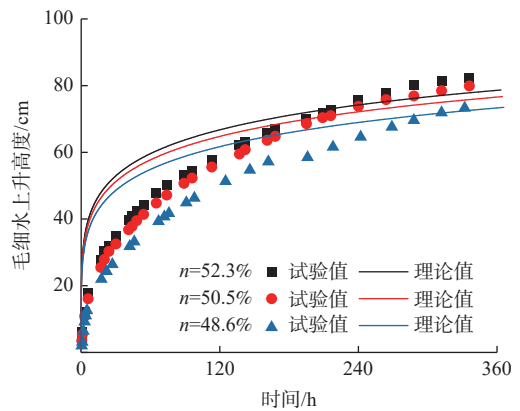


图 7 不同孔隙率下的试验、理论对比曲线

Fig. 7 Experimental and theoretical comparison curves of different porosities

毛细水上升高度主要与孔隙率、饱和渗透系数、进气值对应的毛细水高度、土样分形维数相关。

(2) 毛细水上升高度直接观测法表明毛细水上升呈现初期先快速增加, 然后缓慢增加, 最终趋于稳定。

(3) 毛细水上升试验结果表明: 土样颗粒粒径分布的分形维数越大, 得到的毛细水上升高度越大; 土样的干密度越小, 即孔隙率越大, 得到的毛细水上升高度越大。

(4) 在毛细水上升高度模型中, 考虑到分形维数变化仅改变进气值对应的毛细水高度, 不改变饱和渗透系数; 而孔隙率变化仅导致饱和渗透系数变化, 不改变进气值对应的毛细水高度。得到的计算结果与试验结果趋势一致, 验证了模型的准确性。

参考文献 (References) :

[1] 刘建强, 许强, 郑光, 等. 贵州省鸡场滑坡地下水化学特征反映的水-岩(土)作用[J]. 水文地质工程地质,

- 2023, 50(2): 132 - 140. [LIU Jianqiang, XU Qiang, ZHENG Guang, et al. Water-rock/soil interaction reflected by the chemical characteristics of groundwater of Jichang landslide in Guizhou Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 132 - 140. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 赵明华, 刘小平, 陈安. 非饱和土路基毛细作用分析 [J]. 公路交通科技, 2008, 25(8): 26 - 30. [ZHAO Minghua, LIU Xiaoping, CHEN An. Analysis of capillary effect in unsaturated roadbed[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(8): 26 - 30. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 黄晓明. 路基路面工程 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. [HUANG Xiaoming. Subgrade and pavement engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)]
- [4] 汤明高, 吴川, 吴辉隆, 等. 水库滑坡地下水动态响应规律及浸润线计算模型——以石榴树包滑坡为例 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 115 - 125. [TANG Minggao, WU Chuan, WU Huilong, et al. Dynamic response and phreatic line calculation model of groundwater in a reservoir landslide: Exemplified by the Shiliushubao landslide[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(2): 115 - 125. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 李强, 李同录, 李华, 等. 毛细水作用下非饱和土压缩过程的微观非连续变形数值分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 135 - 143. [LI Qiang, LI Tonglu, LI Hua, et al. Numerical analysis of evolution of the unsaturated soil micro-structure with capillary action during compression[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(4): 135 - 143. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 肖红宇, 刘明寿, 彭鹏程, 等. 基于黏性土分形特征的毛细水上升高度研究 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(6): 48 - 52. [XIAO Hongyu, LIU Mingshou, PENG Pengcheng, et al. A study of the height of capillary water rise based on fractal characteristics of cohesive soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(6): 48 - 52. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 胡明鉴, 张晨阳, 崔翔, 等. 钙质砂中毛细水高度与影响因素试验研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4157 - 4164. [HU Mingjian, ZHANG Chenyang, CUI Xiang, et al. Experimental study on capillary rise and influencing factors in calcareous sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4157 - 4164. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 邓改革, 何建国, 康宁波. 基于多物理场耦合的毛细水高度研究 [J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 136 - 141. [DENG Gaige, HE Jianguo, KANG Ningbo. Research on capillary water height based on multi-physical field coupling[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 136 - 141. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 吕秋丽, 杨海华. 不同土质孔隙结构特点及其毛细水上升规律分析 [J]. 能源与环保, 2019, 41(5): 102 - 106. [LÜ Qiuli, YANG Haihua. Pore structure characteristics of different soils and analysis of capillary water rising law[J]. China Energy and Environmental Protection, 2019, 41(5): 102 - 106. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 杨海华, 吕秋丽, 杨武, 等. 利用柱状换土毛细作用提升地下水实现胡杨自我恢复的探索研究 [J]. 节水灌溉, 2020(12): 51 - 56. [YANG Haihua, LÜ Qiuli, YANG Wu, et al. Study on self recovery of populus euphratica using capillary action of column soil exchange to enhance groundwater[J]. Water Saving Irrigation, 2020(12): 51 - 56. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘杰, 姚海林, 卢正, 等. 非饱和土路基毛细作用的数值与解析方法研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 421 - 427. [LIU Jie, YAO Hailin, LU Zheng, et al. Study of analytic and numerical methods for capillary action of unsaturated soil subgrade[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup 2): 421 - 427. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 朱志铎, 彭宇一, 张文超, 等. 高等级公路粉土路基毛细水处治的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 52 - 55. [ZHU Zhiduo, PENG Yuyi, ZHANG Wenchao, et al. Experimental study on capillary water in silty subgrade of highway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Sup 1): 52 - 55. (in Chinese with English abstract)]
- [13] HIRD R, BOLTON M D. Clarification of capillary rise in dry sand[J]. *Engineering Geology*, 2017, 230: 77 - 83.
- [14] 高大钊, 袁聚云. 土质学与土力学 [M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2001. [GAO Dazhao, YUAN Juyun. Soil science and soil mechanics[M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese)]
- [15] 董斌, 张喜发, 李欣, 等. 毛细水上升高度综合试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1569 - 1574. [DONG Bin, ZHANG Xifa, LI Xin, et al. Comprehensive tests on rising height of capillary water[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1569 - 1574. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 杜红普, 刘波, 王华军, 等. 基于土水特征曲线预测多

- 孔介质毛细水上升过程[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(3): 345 - 350. [DU Hongpu, LIU Bo, WANG Huajun, et al. Prediction of capillary rise in porous media based on soil water characteristic curve[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(3): 345 - 350. (in Chinese with English abstract)]
- [17] LU Ning, LIKOS W J. Rate of capillary rise in soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(6): 646 - 650.
- [18] MANDELROT, BENOIT B. The fractal geometry of nature[J]. *American Journal of Physics*, 1984, 91(9): 594 - 598.
- [19] 刘松玉, 方磊, 陈浩东. 论我国特殊土粒度分布的分形结构[J]. *岩土工程学报*, 1993, 15(1): 23 - 30. [LIU Songyu, FANG Lei, CHEN Haodong. Fractal structure of granularity distribution of regional soils in China[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1993, 15(1): 23 - 30. (in Chinese with English abstract)]
- [20] TERZAGHI K. *Theoretical soil mechanics*[M]. New York: Wiley, 1943.
- [21] 徐永福, 叶翠明, 赵书权, 等. 压应力对非饱和土渗透系数的影响[J]. *上海交通大学学报*, 2004, 38(6): 982 - 986. [XU Yongfu, YE Cuiming, ZHAO Shuquan, et al. Effect of compressive stress on hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2004, 38(6): 982 - 986. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for investigation of geotechnical engineering: GB 50021—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)]
- [23] 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020. [Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communication Press, 2020. (in Chinese)]
- [24] 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 with English abstract)]
- [25] 陶高粱. 岩土多孔介质孔隙结构的分形研究及其应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010. [TAO Gaoliang. Fractal approach on pore structure of rock and soil porous media and its applications[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)]
- [26] ZHOU Annan, FAN Yang, CHENG W C, et al. A fractal model to interpret porosity-dependent hydraulic properties for unsaturated soils[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 3965803.
- [27] LEROUEIL S, BOUCLIN G, TAVENAS F, et al. Permeability anisotropy of natural clays as a function of strain[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, 27(5): 568 - 579.
- [28] TAVENAS F, JEAN P, LEBLOND P, et al. The permeability of natural soft clays. Part II: Permeability characteristics[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1983, 20(4): 645 - 660.

编辑: 刘真真